

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.**



19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

12 Pat ntschrift
10 DE 198 45 329 C 2

51 Int. Cl.7:
H 01 J 37/244
H 01 J 37/28

21 Aktenzeichen: 198 45 329.9-33
22 Anmeldetag: 1. 10. 1998
43 Offenlegungstag: 23. 9. 1999
45 Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 27. 9. 2001

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

66 Innere Priorität:
198 10 301.8 10. 03. 1998
73 Patentinhaber:
Essers, Erik, 76131 Karlsruhe, DE
74 Vertreter:
v. Bezold & Sozien, 80799 München

72 Erfinder:
gleich Patentinhaber

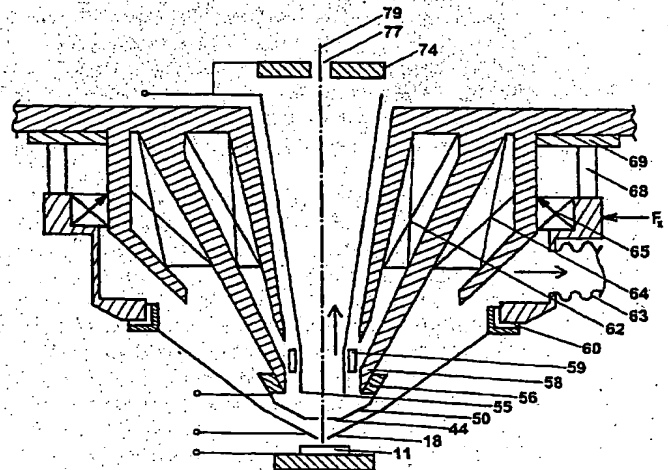
56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE 196 05 855 A1
DE 195 49 022 A1
DE 42 36 273 A1
DE 37 03 028 A1
DE 36 38 682 A1
US 54 12 211
US 54 12 209
US 53 96 067
EP 07 90 634 A1
WO 90 04 261 A1
WO 88 09 564 A1

Scanning, 12 (1990) 1, 23-27;

54 Rasterelektronenmikroskop

57 Rasterelektronenmikroskop mit einem Strahlerzeuger und einer Probenkammer, zwischen denen eine oder mehrere Druckstufenblenden angeordnet sind, durch deren Öffnungen ein Primärelektronenstrahl auf eine Probe in der Probenkammer lenkbar ist, wobei die der Probe nächste, unterste Druckstufenblende (18), durch die der Primärelektronenstrahl auf die Probe trifft, dazu eingerichtet ist, einen erhöhten Druck in der Probenkammer gegenüber der übrigen Mikroskopsaule des Rasterelektronenmikroskops abzuschirmen und durch ihre Öffnung (16) Sekundärelektronen oder Rückstreuungselektronen von der Probe zu mindestens einem Detektor durchzulassen, dadurch gekennzeichnet, daß oberhalb der untersten Druckstufenblende (18) mindestens eine Elektrode (24, 43, 44, 50, 55) angeordnet ist, die gegenüber der Druckstufenblende (18) auf positivem Potential liegt und dazu eingerichtet ist, die Sekundärelektronen oder Rückstreuungselektronen von der Probe hin zum Detektor (51, 74, 91) zu beschleunigen, der ein hochempfindlicher, gegenüber der Probe positiv vorgespannter Detektor ist.



DE 198 45 329 C 2

DE 198 45 329 C 2

Die Erfindung betrifft ein Rasterelektronenmikroskop (REM), insbesondere ein unter etwas erhöhtem Druck arbeitendes Rasterelektronenmikroskop oder die Umrüstung eines unter Vakuum betriebenen Rasterelektronenmikroskops für den Betrieb mit Gas in der Probenkammer, und bezieht sich insbesondere auf eine verbesserte Detektionseffizienz eines derartigen Mikroskops (d. h. auf die Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnis der damit aufgenommenen Bilder), insbesondere beim Betrieb mit niedriger Primärenergie.

Bei einem Rasterelektronenmikroskop, das unter etwas erhöhtem Druck arbeitet (Druck-REM), ist in der Probenkammer üblicherweise ein maximaler Betriebsdruck von einigen Hektopascal bis einigen Kilopascal zugelassen. Die Primärelektronen haben bei diesem Druck nur eine kurze mittlere freie Weglänge. Deshalb wird die Mikroskopsäule zur Probenkammer hin durch eine Druckstufenblende (oder druckbegrenzende Blende) abgeschlossen, durch die der Primärelektronenstrahl in die Probenkammer eintritt. Oberhalb dieser Druckstufenblende ist der Druck um mehrere Zehnerpotenzen verringert.

Mit einer Szintillator-Lichtleiter-Kombination, die zwischen der Probe und der Druckstufenblende angeordnet ist, können die von der Probe emittierten Rückstreuielektronen detektiert werden. Eine demgegenüber verbesserte Ortsauflösung erhält man bei der Verwendung der von der Probe emittierten Sekundärelektronen, die mit Hilfe einer Kollektorelektrode detektiert werden können (WO 88/09564 A1). Dabei ist üblicherweise die Unterseite der Druckstufenblende als Kollektorelektrode ausgebildet oder eine separate Kollektorelektrode unterhalb der Druckstufenblende angeordnet.

Bei anderen Rasterelektronenmikroskopen, die unter etwas erhöhtem Druck arbeiten, findet die Detektion der Sekundärelektronen durch die Öffnung der Druckstufenblende hindurch in einer Art Vorkammer statt, die nach oben zur Objektivlinse hin durch eine weitere Druckstufenblende abgeschlossen ist. Als Detektor für die Sekundärelektronen wird auch hier eine Kollektorelektrode verwendet (WO 90/04261 A1). Diese Gestaltung wurde zwar erprobt (G. D. Danilatos, "Design and Construction of an Environmental SEM; Part 4", Scanning Vol. 12 (1990), S. 23), hat sich jedoch in der praktischen Anwendung nicht durchgesetzt.

Detektorsysteme mit Kollektorelektroden haben wegen des Rauschens bei der nachfolgenden elektronischen Verstärkung eine schlechte Nachweisempfindlichkeit und erfordern deshalb eine Vorverstärkung des Sekundärelektronensignals vor dem Erreichen der Kollektorelektrode. Diese Vorverstärkung geschieht mit Hilfe eines elektrischen Feldes zwischen der Probe und der Kollektorelektrode, durch das die, von der Probe emittierten Sekundärelektronen beschleunigt werden, so daß sie Gasmoleküle ionisieren können. Nach dem Stoß mit den Gasmolekülen werden die dabei im Gas erzeugten Sekundärelektronen und die bereits vorher vorhandenen Sekundärelektronen wieder durch das elektrische Feld beschleunigt und erzeugen weitere Sekundärelektronen im Gas. Auf diese Weise wird durch die von der Probe emittierten Sekundärelektronen eine Sekundärelektronenkaskade ausgelöst, die schließlich die Kollektorelektrode erreicht.

Trotz dieser Kaskaden-Vorverstärkung ist das Signal-zu-Rausch-Verhältnis der bei etwas erhöhtem Druck aufgenommenen Bilder, bei gleicher Strahlstromstärke, wesentlich schlechter als bei den Bildern, die ohne erhöhten Druck mit konventionellen Sekundärelektronendetektoren aufgenom-

men werden. Insbesondere für die Untersuchung empfindlicher Proben (beispielsweise Halbleiterbauelemente, Kunststoffe, biologische und medizinische Proben) stellt deshalb die Verbesserung der Detektionseffizienz und insbesondere die Verringerung des Detektor-Rauschens der Druck-REMs eine wichtige Aufgabe dar.

Bei der Untersuchung empfindlicher Proben ist weiterhin die Verwendung einer niedrigen Primärenergie vorteilhaft, um der Probe weniger Energie zuzuführen und um die Schädigung der Probe durch den Elektronenstrahl auf eine dünne Oberflächenschicht zu begrenzen. Die bisher bekannten Druck-REMs benötigen für ihre Kollektorelektrode eine Sekundärelektronenkaskade im Gas und sind deshalb für den Betrieb mit niedriger Primärenergie (von beispielsweise 1 keV) ungeeignet. Für den Betrieb mit niedriger Primärenergie sind nämlich eine möglichst kurze Gasstrecke zwischen der Probe und der darüberliegenden Druckstufenblende, sowie ein möglichst geringer Druck oberhalb der Druckstufenblende erforderlich, da mit abnehmender Primärenergie auch die mittlere freie Weglänge der Primärelektronen im Gas abnimmt. Unter diesen Bedingungen ist jedoch keine befriedigende Kaskaden-Vorverstärkung mehr möglich, so daß die bisher bekannten Druck-REMs beim Betrieb mit Gas in der Probenkammer erst ab einer Primärenergie von 3 keV verwendet werden können. Aber auch bei 3 keV wird durch den hohen Anteil an gestreuten Primärelektronen ein Signal-Untergrund erzeugt, der dazu führt, daß die Bilder ein noch wesentlich schlechteres Signal-zu-Rausch-Verhältnis aufweisen als bei hoher Primärenergie.

Weitere rasterelektronenmikroskopische Anordnungen sind aus DE-OS 196 05 855, DE-OS 195 49 022, DE-OS 36 38 682, US 5 412 211 A, US 5 412 209 A und US 5 396 067 A bekannt.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein verbessertes, unter etwas erhöhtem Druck arbeitendes REM (im folgenden: Druck-Rasterelektronenmikroskop oder Druck-REM) anzugeben, das die genannten Nachteile herkömmlicher REMs nicht aufweist, und insbesondere die Detektionseffizienz von Druck-REMs, bei denen die Detektion durch die Druckstufenblende stattfindet, durch die die Mikroskopsäule zur Probenkammer hin abgeschlossen ist (bzw. das Signal-zu-Rausch-Verhältnis der damit aufgenommenen Bilder), insbesondere beim Betrieb mit niedriger Primärenergie zu verbessern.

Diese Aufgabe wird durch, ein REM mit den Merkmalen gemäß Patentanspruch 1 und/oder Patentanspruch 2 gelöst. Vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

Erfindungsgemäß wird die Aufgabe insbesondere gemäß einem ersten Gesichtspunkt dadurch gelöst, daß oberhalb der Druckstufenblende ein oder mehrere Elektrodenelemente (massive Elektroden oder dünne Elektroden-schichten) angeordnet sind, die gegenüber der Druckstufenblende auf positivem Potential liegen, wobei als Detektor für die in der Probe und im Gas erzeugten Sekundärelektronen keine Kollektorelektrode, sondern ein oder mehrere Detektoren mit höherer Nachweisempfindlichkeit verwendet werden.

Der Vorteil der Erfindung besteht insbesondere darin, daß – unabhängig von dem Vorhandensein einer Sekundärelektronenkaskade – eine hohe Detektionseffizienz für die von der Probe emittierten Sekundärelektronen und insbesondere ein geringes Rauschen des Detektorsystems erzielt werden. Bei den erfindungsgemäßen Druck-REMs kann die Länge der Wegstrecke, die die Primärelektronen durch das Gas zurücklegen müssen, sehr klein (< 300 µm) gemacht werden, indem ein kurzer Abstand zwischen der Probe und der Druckstufenblende verwendet wird und oberhalb der Druckstufenblende stark abgepumpt wird. Die bisher bekannten

Druck-REMs sind für solche kurzen Wegstrecken ($< 300 \mu\text{m}$) der Primärelektronen durch das Gas hingegen prinzipiell ungeeignet, weil sich dabei weder unterhalb noch oberhalb der Druckstufenblende eine ausreichende Sekundärelektronenkaskade ausbilden kann.

Mit der guten Eignung für eine kurze Wegstrecke der Primärelektronen durch das Gas werden durch die erfindungsgemäßen Druck-REMs insbesondere zwei wichtige neue Anwendungsgebiete für Druck-REMs erschlossen.

Erstens wird Rasterelektronenmikroskopie bei geringer Primärenergie (beispielsweise 1 keV und weniger) mit Gas in der Probenkammer (beispielsweise Wasserdampf bei einem Druck von 10 hPa) problemlos möglich. Wegen der hohen Detektionseffizienz und des geringen Rauschens des Detektorsystems ist dabei nur eine geringe Strahlstromstärke erforderlich.

Eine Anwendungsmöglichkeit besteht beispielsweise in der zerstörungsfreien Abbildung besonders empfindlicher Proben (beispielsweise bestimmter Kunststoffproben). Hierbei wird die Probe (beispielsweise durch Abscheidung aus der Gasphase) mit einem gleichmäßig dünnen Flüssigkeitsfilm bedeckt, dessen Schichtdicke so groß ist wie die Reichweite der Primärelektronen. (Zum Erreichen eines gleichmäßig dünnen Flüssigkeitsfilmes sollte die Flüssigkeit eine gute Adhäsion an der Probenoberfläche und eine sehr geringe Oberflächenspannung aufweisen. Außerdem ist eine hohe Dichte wünschenswert, damit nur eine geringe Schichtdicke erforderlich ist.) Bei der anschließenden Untersuchung im Druck-REM wird eine möglichst geringe Primärenergie (beispielsweise zwischen 200 eV und 1 keV) verwendet. Hierfür ist die Reichweite der Primärelektronen in der Flüssigkeit so gering, daß die Auflösungsver schlechterung durch den Flüssigkeitsfilm bei mittlerer (beispielsweise zehntausendfacher) Vergrößerung kaum zu bemerken ist. Die Verwendung einer möglichst geringen Primärenergie wird dabei erleichtert, wenn mit einem gekühlten Probenhalter der Dampfdruck der Flüssigkeit verringert wird.

Zweitens wird durch die erfindungsgemäßen Druck-REMs bei hoher Primärenergie ($> 15 \text{ keV}$) Rasterelektronenmikroskopie mit Sekundärelektronen bei ungewöhnlich hohem Druck ($> 100 \text{ hPa}$) möglich. Bei Verwendung einer Druckstufenblende mit sehr kleinem Bohrungsdurchmesser (von beispielsweise $30 \mu\text{m}$) ist, bei extrem kleinen Abständen ($< 60 \mu\text{m}$) zwischen der Probe und der Druckstufenblende, sogar der Betrieb bei Umgebungsdruck (1013 hPa) möglich.

Außerdem kann insbesondere bei niedriger Primärenergie mit Hilfe bestimmter Gase (beispielsweise Sauerstoff oder sauerstoffhaltige Verbindungen) der Probenkontamination entgegengewirkt werden, die bei niedriger Primärenergie ein Problem in der Rasterelektronenmikroskopie darstellt. (Eine wirkungsvolle Reinigung der Probe vor der Untersuchung in REMs kann erreicht werden, wenn in die Schleuse ein Hochfrequenzplasmareinigungsgerät integriert wird.)

Eine weitere Verbesserung der Detektionseffizienz von Druck-REMs, bei denen die Detektion der Sekundärelektronen durch eine oder mehrere Druckstufenblenden hindurch stattfindet, erreicht man gemäß einem zweiten Gesichtspunkt der Erfindung durch die Vergrößerung des Anteils der Sekundärelektronen, die durch die Druckstufenblenden hindurch gelangen. Dieser Anteil kann vergrößert werden, indem mindestens eine Druckstufenblende schichtweise aufgebaut wird aus zwei oder mehr leitfähigen Schichten mit dazwischenliegenden schlecht leitenden oder isolierenden Schichten, so daß die Unterseite und die Oberseite der Druckstufenblende auf verschiedene Potentiale gelegt werden können. Dadurch wird in der Bohrung der Druckstufenblende ein elektrisches Feld erzeugt, das den Transport der

Sekundärelektronen verbessert. Gleichzeitig ermöglicht dieses in der Bohrung der Druckstufenblende erzeugte elektrische Feld auch die Verwendung einer größeren Bohrungslänge für die Druckstufenblendenöffnung, so daß der Druck durch die Druckstufenblende stärker verringert wird oder ein größerer Öffnungsdurchmesser verwendet werden kann.

Die oben genannten ersten und zweiten Gesichtspunkte der Erfindung können einzeln oder gemeinsam implementiert werden, um die oben aufgeführte Aufgabe zu lösen. In beiden Fällen wird die Beschleunigung von Sekundärelektronen aus einem probennahen Bereich mit erhöhtem Druck hin zum Detektor in einen probenfernen Bereich mit reduziertem Druck (Vakuum) unterstützt.

Bei den üblichen Sekundärelektronendetektoren mit hoher Nachweisempfindlichkeit löst jedes einzelne Sekundärelektron eine große Anzahl Photonen, Elektronen oder Elektron-Loch-Paare aus, die dann detektiert werden. Hierzu ist es erforderlich, daß den Sekundärelektronen vor dem Erreichen des Detektors oder (bei Channelplate und Channeltron) entlang der Detektoroberfläche Energie zugeführt wird. Zu diesem Zweck muß zwischen der Probe und dem Detektor bzw. (bei Channelplate und Channeltron) entlang der Detektoroberfläche eine große elektrische Spannung angelegt werden.

Eine bevorzugte Ausführungsform der Erfindung besteht deshalb darin, daß die gesamte Detektoroberfläche oder Teile der Detektoroberfläche auf einem Potential liegen, das gegenüber dem Potential der Probe um mehr als 1000 V positiv ist. Die Verwendung solcher Detektoren in der Probenkammer eines Druck-REMs, würde zu Überschlagen führen.

Eine bevorzugte Ausführungsform der Erfindung besteht darin, daß das Druck-REM eine kombinierte elektrostatische und magnetische Objektivlinse besitzt. Gegenüber einer rein elektrostatischen Objektivlinse hat dies den Vorteil, daß das so ausgestaltete Druck-REM auch bei den üblichen Primärenergien oberhalb von 3 keV eingesetzt werden kann. Verglichen mit einer rein magnetischen Objektivlinse, ist eine kombinierte elektrostatische und magnetische Linse in Verbindung mit den meisten Ausführungsformen erfindungsgemäßer Druck-REMs wesentlich besser geeignet, da bei ihr durch die elektrostatische Linse den Sekundärelektronen Energie zugeführt und dadurch ihre mittlere freie Weglänge stark vergrößert wird. Insbesondere für die Untersuchung nichtmagnetischer Proben ergibt dabei die Ausführungsform mit einer Einpollinse als magnetischer Linse (EP 0790634 A1, DE 42 36 273 A1) eine besonders gute Auflösung. Bei Verzicht auf hohe Primärenergien ist auch die Ausführungsform mit einer rein elektrostatischen Objektivlinse (DE 37 03 029 A1) von Vorteil, die sich insbesondere durch ihren einfachen konstruktiven Aufbau und ihre einfache Herstellbarkeit auszeichnet.

Die Realisierung der Erfindung ist nicht auf Druck-REMs beschränkt, sondern kann durch Umrüstung auch bei REMs erfolgen, die normalerweise mit evakuierter Probenkammer betrieben werden. Die leichte Umrüstbarkeit zwischen den beiden Anwendungsfällen stellt einen Vorteil der Erfindung dar.

Weitere Ausführungsformen und Vorteile der Erfindung werden aus den beigefügten Zeichnungen und ihrer Beschreibung ersichtlich. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Anordnung von Druckstufenblenden, Objektivlinse, Elektroden und Detektor für ein Druck-REM,

Fig. 2 einen Ausschnitt aus Fig. 1, in dem die Druckstufenblenden dargestellt sind,

Fig. 3 analog zu Fig. 2 eine schematische Darstellung mit einer schichtweise aufgebauten Druckstufenblende,

Fig. 4 für einen etwas größeren Ausschnitt als in Fig. 2 eine schematische Darstellung einer weiteren Variante eines erfindungsgemäßen Druck-REMs, insbesondere mit einer modifizierten Befestigung der oberen Druckstufenblende,

Fig. 5 eine schematische Darstellung eines etwas größeren Ausschnitts als in Fig. 2 für eine weitere Variante eines erfindungsgemäßen Druck-REMs mit einer schichtweise aufgebauten oberen Druckstufenblende, die zusätzliche Öffnungen für den Durchtritt von Sekundärelektronen aufweist,

Fig. 6 eine schematische Darstellung eines weiteren Ausführungsbeispiels, das in Verbindung mit einer rein magnetischen Objektivlinse verwendet werden kann,

Fig. 7 eine Darstellung entsprechend Fig. 6, mit einer anderen Schnittebene,

Fig. 8 eine schematische Darstellung einer Erweiterung des Ausführungsbeispiels aus Fig. 1 mit einem zusätzlichen oberen Detektor, und

Fig. 9 eine Abwandlung des Ausführungsbeispiels aus Fig. 8 mit einer anderen Variante des zusätzlichen oberen Detektors.

Die Darstellungen in den Figuren beschränken sich auf die zum Verständnis der Erfindung wichtigen Komponenten im Bereich zwischen der Probe und dem Detektor. Die übrigen Teile eines Rasterelektronenmikroskops, zu denen beispielsweise Gehäusewände, Vakuumpumpen, Vakuumeleitungen, die Kathode, die Elektroden zur Strahlformung, die Kondensorlinse, die Aperturblende, die Stigmatorien, die Alignment-Spulen und Steuereinrichtungen zählen, sind nicht dargestellt. So zeigt insbesondere Fig. 1 für ein Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Druck-REMs die für das Verständnis der Erfindung wesentlichen Bestandteile.

Der Primärelektronenstrahl gelangt längs der optischen Achse 79 von oben durch die Öffnung 77 des Detektors 74. Die zum Abrastern der Probe 11 erforderliche Ablenkung des Primärelektronenstrahles wird mit Hilfe der Ablenkspulen 59 erzeugt. Die Fokussierung des Primärelektronenstrahles geschieht mit Hilfe der von den Elektroden 44, 50 und 55 gebildeten elektrostatischen Linse und des von der magnetischen Linse 62 und/oder von der magnetischen Einpollinse 64 erzeugten Magnetfeldes. Einen weiteren Beitrag zur Fokussierung des Primärelektronenstrahles liefert das elektrische Feld zwischen der Elektrode 44 und der Elektrode 18. Es ist auch möglich, die magnetische Linse 62 mit zur optischen Achse hin geöffnetem Polschuhspalt oder die magnetische Einpollinse 64 wegzulassen.

Die Elektrode 55 liegt gegenüber den Elektroden 44 und 50 auf stark positivem Potential. Die Potentialdifferenz beträgt bevorzugt 1 bis 15 kV und kann beispielsweise 7 keV betragen. Bei geringer Primärenergie < 1 keV und einer zu großen Potentialdifferenz zwischen den Elektroden 44 und 55 würde die elektrostatische Linse den Primärstrahl oberhalb der unteren Druckstufenblende 18 fokussieren. Die Elektroden 50 und 44 sind über die Isolierung 56 am Polschuh 58 zentriert. Die Elektrode 44 liegt gegenüber der Elektrode 18 auf positivem Potential mit einer bevorzugten Potentialdifferenz von 50 bis 2000 V. Die Elektrode 18, die über die Isolierung 60 befestigt ist, liegt gegenüber der Probe 11 auf positivem oder auf demselben Potential. Die Größe der angelegten Spannungen wird weiter unten in Zusammenhang mit Fig. 2 besprochen.

Da die beiden Elektroden 18 und 44 eine elektrostatische Linse bilden, ist es für die Auflösung vorteilhaft, daß die kegelförmige Elektrode 18 während des Betriebes mit großer Genauigkeit in Bezug auf die optische Achse 79 zentriert werden kann. Eine geeignete Möglichkeit hierfür besteht beispielsweise in der Verwendung von Mikrometerschrauben und/oder geregelten Piezostellsystemen, deren

Krafteinwirkungen F_x und F_y (in x- und y-Richtung) im dargestellten Ausführungsbeispiel die über den Umfang verteilten Rundstäbe 68 elastisch verformen. Die Elektrode 44 muß nicht so genau zentrierbar sein wie die Elektrode 18, da die Äquipotentialflächen des elektrischen Feldes im Bereich der Öffnung 41 der Elektrode 44 nahezu eben sind.

Die Elektroden 18 und 44 sind gleichzeitig als Druckstufenblenden ausgebildet. Durch die Öffnung der Druckstufenblende 18 strömt Gas aus der Probenkammer nach oben in die Mikroskopsäule, das durch den Wellschlauch 63 und durch die Öffnung der Elektrode 55 abgepumpt wird, wie es die Pfeile andeuten. Die Abdichtung der zentrierbaren Druckstufenblende 18 gegenüber dem äußeren Polschuh erfolgt durch den Simmerring 65.

Bei der in Fig. 1 dargestellten Ausführung können diejenigen Bauteile (18, 44, 50, 56, 60, 63, 65, 68, 69), die beim Betrieb mit Vakuum in der Probenkammer eine unnötige Begrenzung für das Blickfeld und den Arbeitsabstand darstellen, leicht ausgebaut werden, um das Druck-REM im Vakuumbetrieb ohne sie mit einer anderen Elektrode 50 zu betreiben. Zu diesem Zweck kann das Bauteil 69 von dem darüberliegenden Teil losgeschraubt werden und ist die Isolierung 56 leicht demontierbar am Polschuh 58 befestigt. Weiterhin ist die Druckstufenblende 18 leicht auswechselbar, so daß je nach Anwendungsfall Druckstufenblenden mit unterschiedlich großen Öffnungen verwendet werden können.

Ein vergrößerter Ausschnitt aus Fig. 1 mit den Druckstufenblenden 18 und 44 und der Probe 11 ist in Fig. 2 schematisch dargestellt. Die Elektrode 44 liegt gegenüber der Elektrode 18 auf positivem Potential, dessen Größe so gewählt ist, daß direkt oberhalb und direkt unterhalb der Öffnung 41 etwa dieselbe elektrische Feldstärke herrscht. Hierdurch wird erreicht, daß die Krümmung der Äquipotentialflächen im Bereich der Öffnung 41 möglichst schwach ist. Außerdem ist die obere Druckstufenblende 44 sehr dünn, um eine möglichst geringe Krümmung der Äquipotentialflächen in der Nähe der optischen Achse hervorzurufen. Ihre bevorzugte Dicke in der Nähe der optischen Achse ist kleiner als 300 µm und größer als 0,4 µm (z. B. 20 µm). Sie kann entweder aus Metall bestehen (beispielsweise als Dünnschichtblende, die bei Bedarf auch mit dem Primärelektronenstrahl beheizt werden kann) oder kann durch Ätzen insbesondere aus Halbleitermaterial (beispielsweise Silizium) hergestellt werden. Im letztgenannten Fall kann beim Ätzen entweder eine dünne Schicht des Halbleiters stehen gelassen werden oder nur eine Metallschicht übriggelassen werden, die vorher auf den Halbleiter aufgebracht wurde.

Die bevorzugte Größe der Öffnungen 16 und 41 der Druckstufenblenden in Fig. 2 ist abhängig vom gewünschten maximal zulässigen Druck in der Probenkammer, von der gewünschten kleinsten verwendbaren Primärenergie, von der Spannung und dem Abstand zwischen den Elektroden 18 und 44 und von der Güte des Vakuums, das die Kathode (beispielsweise ein Schottky-Emitter) benötigt. Der Durchmesser der Öffnung 16 der Druckstufenblende 18 kann beispielsweise 20 µm bis 500 µm betragen. Bei Verzicht auf die Eignung für niedrige Primärenergien oder bei Beschränkung auf niedrige Drücke in der Probenkammer, kann die Größe der Öffnung 16 aber beispielsweise auch 1000 µm betragen. Der bevorzugte Durchmesser der Öffnung 41 kann beispielsweise 100 µm bis 2000 µm betragen. Er ist vorzugsweise mindestens so groß wie der Durchmesser der Öffnung 16.

Bei Verwendung von Halbleitermaterial für die Druckstufenblende 18, kann sie gleichzeitig auch als Halbleiterdetektor für Rückstreuelektronen ausgestaltet werden. Eine Möglichkeit hierfür besteht darin, daß die Unterseite 14 und der

untere Bereich der Außenseite 15 der Druckstufenblende notiert und mit einer dünnen Metallschicht bedampft werden, so daß sich ein Schottky-Kontakt ausbildet.

Der Primärelektronenstrahl tritt in Fig. 2 von oben durch die Öffnung 16 in die Probenkammer ein, durchquert das Gas in der Probenkammer und trifft auf die Probe 11, wo er Sekundärelektronen und Rückstreuелеktronen erzeugt. Die Sekundärelektronen haben einen großen Wirkungsquerschnitt für elastische Streuung. Ihre Bewegungsrichtung wird deshalb, ähnlich wie bei einem Diffusionsvorgang, häufig umgelenkt und es besteht die Gefahr, daß sie von der Probe absorbiert werden. Die Sekundärelektronen werden deshalb mit Hilfe eines elektrischen Feldes zur Öffnung 16 gelenkt, das entweder nur aus dem Felddurchgriff durch die Öffnung 16 besteht oder durch das zusätzliche Anlegen einer Spannung zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 erzeugt wird.

In Abhängigkeit vom Gas und Druck in der Probenkammer, Durchmesser der Öffnung 16, Länge der Bohrungswandung 17, Kegelöffnungswinkel β und γ der inneren Kegelfläche 22 und Abstand zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 gibt es jeweils eine optimale Spannung zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18, für die die meisten Sekundärelektronen zum Detektor 74 gelangen. Diese Spannung kann zwischen null Volt und einigen hundert Volt liegen. Für kleine Abstände zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 kann der Felddurchgriff durch die Öffnung 16 der Druckstufenblende (in Abhängigkeit von den oben genannten Parametern) ausreichend groß sein, um die Sekundärelektronen zur Öffnung 16 zu lenken. Dann können die Probe 11 und die Druckstufenblende 18 auf demselben Potential liegen.

Das Anlegen einer Spannung zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 hat mehrere Auswirkungen: Es erzeugt ein stärkeres elektrisches Feld und verbessert dadurch den Transport der Sekundärelektronen nach oben zur Druckstufenblende 18. Gleichzeitig verringert es die Durchwölbung der Äquipotentialflächen nach unten innerhalb und direkt unterhalb der Öffnung 16, so daß die Sekundärelektronen in diesem Bereich weniger stark zur optischen Achse 79 hin gelenkt werden. Andererseits bewirkt es jedoch zusammen mit der kegelförmigen Elektrode 18, daß die Sekundärelektronen weiter unterhalb der Öffnung 16 zur optischen Achse 79 hin gelenkt werden.

Für eine nicht zu große Bohrungslänge der Öffnung 16 und kleine Abstände zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 (je nach Druck in der Probenkammer und Geometrie der Druckstufenblende 18 beispielsweise für Abstände bis zum doppelten Durchmesser der Öffnung 16) gelangt ein Großteil der Sekundärelektronen auch durch die Öffnung 16, wenn die Spannung zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 so groß gewählt wird, daß die Feldstärke nahe unterhalb der Öffnung 16 etwa gleich groß ist wie in der Öffnung 16. Hierdurch nehmen die Verzerrungen am Rand des Gesichtsfeldes ab, so daß das Gesichtsfeld vergrößert werden kann. Dies gilt insbesondere bei der Verwendung von Druckstufenblenden 18, deren innere Kegelfläche 22 einen großen Kegelöffnungswinkel β hat und bei denen die Länge der Bohrungswandung 17 klein ist im Verhältnis zum Durchmesser 16 der Öffnung. Eine andere Möglichkeit zur Vergrößerung des Gesichtsfeldes besteht darin, daß die am Rande des Gesichtsfeldes auftretenden Verzerrungen nachträglich mit Hilfe eines Bildverarbeitungsprogrammes korrigiert werden.

Für größere Abstände (beispielsweise 1000 μm) und größere Spannungen (beispielsweise 200 V) zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 erhält man eine Sekundärelektronenkaskade als zusätzliche Vorverstärkung.

Bei der Verwendung einer ausreichend großen Druckstufenblendenöffnung 16 ($> 200 \mu\text{m}$) gelangen genug Sekundärelektronen in die Öffnung 16, um hiermit ebenfalls eine gute Detektionseffizienz zu erhalten.

Auch innerhalb der Öffnung 16 der Druckstufenblende ist für den Weitertransport der Sekundärelektronen nach oben das elektrische Feld maßgeblich verantwortlich. Der elektrische Feldverlauf ist diesbezüglich um so günstiger, je kleiner die Länge der Bohrung 16 im Vergleich zu ihrem Durchmesser ist. Insofern wird eine Druckstufenblende 18 bevorzugt, wie sie in Fig. 5 dargestellt ist, die gar keine zylindermantelförmige Bohrungswandung 17 hat, sondern statt dessen nur eine scharfe Innenkante als Begrenzung zwischen der Unterseite 14 und der Oberseite 22 der Druckstufenblende aufweist.

Neben den elektrischen Feldern zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 und innerhalb der Öffnung 16 ist auch das Magnetfeld, das durch die in Fig. 1 abgebildete Einpollinse 64 erzeugt wird, sehr hilfreich für den Transport der Sekundärelektronen zur Öffnung 16 und durch die Öffnung 16 hindurch. Durch das Magnetfeld wird die senkrecht zur optischen Achse 79 stehende Bewegungskomponente der Sekundärelektronen mit Hilfe der Lorentzkraft auf eine Kreisbahn umgelenkt. Hierdurch wird erreicht, daß ein von der Probe emittiertes Sekundärelektron auf seinem Weg nach oben seinen Abstand von der optischen Achse 79 zwischen zwei Stößen maximal um seinen doppelten Larmorradius vergrößern kann. Die niederenergetischen Sekundärelektronen, deren Wirkungsquerschnitt für elastische Streuung besonders hoch ist, haben dabei günstigerweise auch einen besonders kleinen Larmorradius. Da sich die Sekundärelektronen weniger weit von der optischen Achse 79 entfernen können, gelangen bei Verwendung einer Einpollinse mehr Sekundärelektronen durch die Öffnung 16 der Druckstufenblende als ohne Einpollinse.

In den Ausführungsbeispielen aus Fig. 2 bis 4 werden die Sekundärelektronen durch die Öffnung 41 einer weiteren Druckstufenblende gelenkt, oberhalb derer ein gutes Vakuum herrscht, in dem Sekundärelektronen detektiert werden. Bei diesem Funktionsprinzip ist es erforderlich, daß die Sekundärelektronen keine Stöße mehr ausführen, wenn sie auf die Öffnung 41 der oberen Druckstufenblende fokussiert werden. Dies wird durch die Abnahme des Druckes und die Zunahme der elektrischen Feldstärke oberhalb der Öffnung der unteren Druckstufenblende 18 erreicht.

Oberhalb der Öffnung 16 der unteren Druckstufenblende 18 in Fig. 2 nimmt der Druck bis zur Öffnung 41 der oberen Druckstufenblende 44 gegenüber dem Druck der Probenkammer um mehrere Zehnerpotenzen ab. Die Druckabnahme ist abhängig von der Größe der Öffnung 16 der unteren Druckstufenblende. Diese Druckabnahme nach oben hin bewirkt eine Zunahme der mittleren freien Weglänge der Sekundärelektronen. Gleichzeitig nimmt die elektrische Feldstärke oberhalb der Öffnung 16 aufgrund der konischen Form der Elektrode 18 nach oben hin stark zu. Beides zusammen führt dazu, daß die Geschwindigkeit, die die Sekundärelektronen zwischen zwei Stößen erreichen, oberhalb der Öffnung 16 stark zunimmt. Da außerdem auch mit zunehmender Geschwindigkeit die mittlere freie Weglänge der Sekundärelektronen zunimmt, werden die Sekundärelektronen oberhalb der Öffnung 16 innerhalb ihrer freien Weglänge so schnell (und nimmt dabei ihre mittlere freie Weglänge so stark zu), daß die Sekundärelektronen keine Stöße mehr ausführen.

Viele Sekundärelektronen haben ihren letzten Stoß also in geringer Entfernung oberhalb der Öffnung 16. Durch das elektrische Feld zwischen den beiden Elektroden 18 und 44 werden sie anschließend auf die Öffnung 41 der oberen

Druckstufenblende fokussiert. Bevorzugte Kegelöffnungswinkel β für die innere Kegelfläche 22 sind 20° bis 75° . Auch unter der Nebenbedingung, daß die elektrische Feldstärke in der Öffnung 41 und direkt unterhalb der Öffnung 41 gleich groß ist, ist die Fokussierung der Sekundärelektronen auf die Öffnung 41 problemlos möglich. Sogar bei einer vorgegebenen Potentialdifferenz zwischen den Elektroden 44 und 55 und bei vorgegebenen Kegelöffnungswinkeln β und γ wird die Fokussierung der Sekundärelektronen auf die Öffnung 41 erreicht, indem die Lage der Elektrode 44 geeignet gewählt wird: Wenn die Elektrode 50 etwas länger ausgeführt wird und dadurch die Elektrode 44 (mit entsprechend kleinerem Außendurchmesser) etwas weiter unten angeordnet ist, erhält man eine geringere elektrische Feldstärke in der Öffnung 41. Dementsprechend wird auch die Potentialdifferenz zwischen den Elektroden 18 und 44 so stark verringert, daß direkt unterhalb der Öffnung 41 wieder die gleiche Feldstärke herrscht wie in der Öffnung 41. Hierdurch erhält man eine schwächere Fokussierung der Sekundärelektronen, während gleichzeitig auch noch die Wegstrecke verkürzt wird, auf der die Sekundärelektronen fokussiert werden. (Aufgrund der geringeren Potentialdifferenz zwischen den Elektroden 18 und 50 kann diese Strecke noch weiter verkürzt werden, indem der Abstand zwischen den beiden Elektroden verkleinert wird.)

Es kann also durch die Anordnung der Elektrode 44 in geeigneter Höhe immer erreicht werden, daß die Sekundärelektronen auf die Öffnung 41 fokussiert werden. (Nur für sehr große Kegelöffnungswinkel β ist dies nicht möglich.) Eine weitere Möglichkeit, um die Feldstärke in der Öffnung 41 zu vergrößern und dementsprechend die Fokussierung der Sekundärelektronen zu verstärken, besteht darin, die Elektrode 44 in Fig. 2 mit der ebenen Fläche nach oben in die Öffnung der Elektrode 50 einzubauen.

Falls der Durchmesser der Öffnung 41 so klein gewählt wird, daß sich bei unterschiedlich großem Gasdruck in der Probenkammer die etwas unterschiedliche Fokussierung der Sekundärelektronen bemerkbar macht, besteht eine bevorzugte Ausführungsform darin, daß die Fokussierung der Sekundärelektronen auf die Öffnung 41 eingestellt werden kann. (Es ist dabei keine starke Veränderung der Fokussierung erforderlich.) Die Fokussierung der Sekundärelektronen auf die Öffnung 41 wird beispielsweise erreicht, wenn die Spannung zwischen den Elektroden 18 und 44 und proportional dazu auch die Spannung zwischen den Elektroden 44 und 55 verändert werden kann. Eine andere Möglichkeit besteht darin, daß eine der Druckstufenblenden 18 oder 44 höhenverstellbar (d. h. in ihrer Lage entlang der optischen Achse verstellbar) ist. Eine weitere Möglichkeit zur Veränderung der Fokussierung ergibt sich bei der Verwendung einer nicht als Druckstufenblende wirkenden, zusätzlichen Elektrode mit größerem Öffnungsdurchmesser, die zwischen den Elektroden 18 und 44 angebracht und vorzugsweise über eine Isolierung an einer dieser beiden Elektroden befestigt und zentriert ist. Die Potentiale der Elektrode 18 und der zusätzlichen Elektrode können dann so verändert werden, daß die Äquipotentialflächen in der Öffnung 41 weiterhin eben bleiben, während die Fokussierung der Sekundärelektronen verändert wird. Die hier angesprochene einstellbare oder veränderliche Fokussierung der Elektronen ist insbesondere für große Druckstufenblendenöffnungen 16 wichtig.

Der weitere Weg der Sekundärelektronen oberhalb der Elektrode 44 wird im folgenden anhand von Fig. 1 erläutert. Die Sekundärelektronen werden durch das elektrische Feld zwischen den Elektroden 44 und 55 weiter beschleunigt und fliegen mit hoher kinetischer Energie zum Detektor 74. Durch die starke Abnahme des Gasdruckes innerhalb und

oberhalb der Druckstufenblenden 18 und 44 wird erreicht, daß trotz des erhöhten Druckes in der Probenkammer am Ort des Detektors 74 ein hinreichend gutes Vakuum für den Einsatz von Detektoren mit hoher Nachweisempfindlichkeit vorhanden ist. Als Detektor 74 sind insbesondere Szintillator-Lichtleiter-Kombinationen, Channelplates und Halbleiterdetektoren mit einem Metall-Halbleiter-Übergang oder mit einem p-n-Übergang gut geeignet. Es können auch Szintillator-Photomultiplier-Kombinationen auf der Basis von Plastikszintillatoren, YAG-Szintillatoren, YAP-Szintillatoren und dgl. verwendet werden. Bei Verwendung einer Channelplate ist es empfehlenswert, eine zusätzliche Liner-Elektrode für die Öffnung des Detektors vorzusehen, wie sie in DE 37 03 028 A1 verwendet wird.

Fig. 3 zeigt für denselben Ausschnitt wie in Fig. 2 eine andere Variante eines erfindungsgemäßen Druck-REMs zur Illustration des oben genannten zweiten Gesichtspunkts. Die obere Druckstufenblende in Fig. 3 ist schichtweise aufgebaut: Ihre Unterseite 39 und Oberseite 43 bestehen aus leitfähigen Materialien, während in ihrem Inneren zumindest eine Schicht aus isolierendem Material besteht. Die Kontaktierung der leitfähigen Schichten 39 und 43 liegt außerhalb des dargestellten Bereiches.

Die Potentiale der Elektroden 18, 39, und 43 werden so gewählt, daß in den Öffnungen der Elektroden 39 und 43 und im Bereich 41 zwischen den Öffnungen der beiden Elektroden dieselbe elektrische Feldstärke herrscht. Da die bevorzugte Dicke der Elektroden 39 und 43 in der Nähe der optischen Achse 79 sehr klein ($\leq 100 \mu\text{m}$) ist, sind die Äquipotentialflächen im Bereich der Öffnungen der Elektroden 39 und 43 und im Bereich 41 dazwischen nahezu eben. Der bevorzugte Abstand zwischen den Elektroden 39 und 43 beträgt 10 bis $1000 \mu\text{m}$. Eine geeignete Möglichkeit zur Herstellung einer solchen, schichtweise aufgebauten Druckstufenblende mit sehr dünnen Elektroden 39 und 43 besteht beispielsweise darin, daß die Elektroden 39 und 43 Metallbeschichtungen eines Isolators darstellen, zwischen denen der Isolator in einem Bereich um die optische Achse herum weggeätzt wurde. Die Öffnung der Elektrode 39 kann auch gleichgroß oder größer sein als die Öffnung der Elektrode 43. Weiterhin kann auch die untere Druckstufenblende 18 schichtweise aufgebaut werden.

Fig. 4 zeigt für eine andere Variante eines erfindungsgemäßen Druck-REMs einen Ausschnitt mit den Druckstufenblenden. Der Unterschied gegenüber der Variante aus Fig. 2 besteht in der zusätzlichen Halterung 40 für die Druckstufenblende 44 und darin, daß die Elektrode 50 in Fig. 4 ohne die dazwischenliegende Isolierung 56 als direkte Fortsetzung des Polschuhs 58 ausgeführt ist, so daß sie eine besonders gute Zentrierung in Bezug auf die optische Achse aufweist und geerdet ist. Bei dieser Variante ist die Elektrode 50 nicht demontierbar, während die Teile 13, 18, 40 und 44 (und 60, 63, 65, 68 und 69 aus Fig. 1) für den Betrieb des Druck-REMs mit Vakuum in der Probenkammer entfernt werden können.

Die als Federelement ausgeführte Halterung 40 hält die Druckstufenblende 44, die an der Bohrung der Elektrode 50 zentriert ist, in ihrer Lage. Es wäre auch möglich, als Halterung ein Federelement zu verwenden, das sich über eine Isolierung am darunterliegenden Bauteil 18 abstützt. Ferner könnte man die Druckstufenblende 18 auch an der entsprechend umgestalteten Außenkante der Elektrode 50 zentrieren. Es ist auch möglich, die obere Druckstufenblende 44, ihre Halterung 40 und das zusätzliche Abpumpen durch den Wellschlauch 63 (siehe Fig. 1) wegzulassen. Es können dann bei gleichbleibendem Öffnungsdurchmesser der verbleibenden Druckstufenblende 18 jedoch nur wesentlich kleinere Drücke in der Probenkammer verwendet werden.

Beim Vakuumbetrieb mit den in Fig. 2 bis Fig. 4 dargestellten Aufbauten wird nahe oberhalb der Öffnung 16 ein erster Sekundärelektronen-Crossover erhalten, der durch das elektrische Feld zwischen den Elektroden 18 und 44 (bzw. 39) auf die Öffnung 41 abgebildet wird. Die Fokussierung der Sekundärelektronen auf die Öffnung 41 wird dabei durch das Anlegen einer kleinen Spannung zwischen der Probe 11 und der Elektrode 18 und/oder durch eine der in Zusammenhang mit Fig. 2 beschriebenen Maßnahmen erreicht. Für den Vakuumbetrieb mit den in Fig. 2 bis 4

schnittsweise dargestellten Druck-REMs ist die Kombination mit einem zusätzlichen oberen Detektor 91 aus Fig. 8 oder Fig. 9 vorteilhaft. Während die Sekundärelektronen in den Ausführungsbeispielen aus Fig. 2 bis 4 auf die Öffnung 41 der oberen Druckstufenblende fokussiert werden, ist in Fig. 5 ein Ausführungsbeispiel dargestellt, bei dem die Sekundärelektronen nicht auf eine bestimmte Stelle fokussiert werden müssen. Dementsprechend können in Fig. 5 auch die für die Sekundärelektronen-Fokussierung maßgeblichen Parameter frei gewählt werden. Ein weiterer Vorteil der in Fig. 5 dargestellten Ausführung besteht darin, daß ein sehr großer Anteil der Sekundärelektronen zum Signal des Detektors beiträgt.

Der Weg des Primärelektronenstrahls durch die Öffnungen 41 und 16 zur Probe 11, die Spannung zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18, der Weg der Sekundärelektronen von der Probe 11 zur Öffnung 16 und durch die Öffnung 16 hindurch, der positive Einfluß der Einpolinse 64 hierauf, die Größe der Öffnung 16, die Zunahme der elektrischen Feldstärke oberhalb der Öffnung 16 und die Druckabnahme oberhalb der Öffnung 16 sind dieselben wie in Fig. 2. Statt der dünnwandigen Druckstufenblende 44 in Fig. 2 wird in Fig. 5 jedoch das dickwandige Bauteil 42 verwendet. Seine bevorzugte Dicke (Länge des Durchgangs 41) beträgt 0,4 mm bis 6 mm. Es ist schichtweise aus isolierenden und leitfähigen Schichten aufgebaut, die senkrecht zur optischen Achse 79 verlaufen und in Fig. 5 durch die horizontale Schraffur des Bauteils 42 angedeutet sind. Die leitfähigen Schichten haben dabei eine bevorzugte Dicke von weniger als 200 µm, während die isolierenden Schichten auch dicker sein können. Das Bauteil 42 ist in die isolierende Halterung 40 eingepaßt, die das Bauteil 42 an der Bohrung der Elektrode 50 zentriert. Die Oberseite des Bauteils 42 ist von der leitfähigen Schicht 43 bedeckt, die eine Elektrode bildet, die auf demselben Potential wie die Elektrode 50 liegt. Die Unterseiten des Bauteils 42 und der Halterung 40 sind von der leitfähigen Schicht 39 bedeckt. Sie bildet eine Elektrode, die gegenüber der Elektrode 43 auf negativem Potential liegt. Das Bauteil 42 hat einen mittleren Durchgang 41 um die optische Achse 79 herum und zusätzlich noch mehrere Durchgänge 36 über den Umfang verteilt.

Die Oberfläche des Teils 42 in den Durchgängen 36 und 41 ist mit einer schlecht leitfähigen Schicht bedeckt, deren elektrische Parameter beispielsweise denen einer schlecht leitfähigen Schicht entsprechen, wie sie in einem Channeltron oder einer Channelplate verwendet wird. Die schlecht leitfähige Schicht in den Durchgängen 36 und 41 hat einen Gesamtwiderstand, der entlang der optischen Achse gleichmäßig verteilt ist. (Um eine gleichmäßige Verteilung des Widerstandes längs der optischen Achse zu erreichen, kann auch eine zusätzliche schlecht leitfähige Schicht an der Grenzfläche zum Bauteil 40 auf dem Bauteil 42 aufgebracht sein). Dadurch entsteht zwischen den Elektroden 39 und 43, mit denen, die schlecht leitfähige Schicht kontaktiert ist, ein homogenes elektrisches Feld in den Durchgängen 36 und 41. Der schichtweise Aufbau des Bauteils 42 aus abwechselnd dünnen isolierenden und leitfähigen Schichten ergibt auch bei einer etwas ungleichmäßigen Verteilung der

schlecht leitfähigen Schicht im Durchgang 41 ein rotations-symmetrisches elektrisches Feld, so daß eine gute Auflösung erreicht wird.

Die Größe der Spannung zwischen den Elektroden 50 und 55 wurde in Zusammenhang mit Fig. 1 besprochen. Die Spannung zwischen den Elektroden 39 und 43 ist so groß, daß die elektrische Feldstärke innerhalb des Durchgangs 41 gleichgroß ist wie direkt oberhalb des Durchgangs 41. Die Spannung zwischen den Elektroden 25 und 39 ist so groß, daß die elektrische Feldstärke direkt unterhalb des Durchgangs 41 gleichgroß ist wie innerhalb des Durchgangs 41. Die Druckstufenblende 18 liegt auf demselben Potential wie die Elektrode 25 und ist leicht demontierbar an der Elektrode 25 befestigt. Eine bevorzugte Ausgestaltung des Aufbaus aus Fig. 5 besteht darin, daß die Druckstufenblende 18 gewechselt werden kann, ohne daß die Probenkammer belüftet wird. Eine entsprechende Vorrichtung zum Auswechseln der Druckstufenblende (nicht dargestellt) kann beispielsweise am Rand des Probentisches angebracht sein.

Die länggestreckten, schmalen Durchgänge 36 und 41 stellen einen großen Strömungswiderstand für das Gas dar, das sich unterhalb des Bauteils 42 befindet. Dieser Strömungswiderstand ist um mehr als eine Größenordnung höher als der Strömungswiderstand beim Abpumpen durch die in Fig. 1 dargestellte Elektrode 55. Der bevorzugte Durchmesser des Durchgangs 41 beträgt 100 bis 2000 µm. Der bevorzugte Durchmesser der Durchgänge 36 ist kleiner als der bevorzugte Durchmesser des Durchgangs 41. Die Durchgänge 36 weiten sich nach unten hin auf, so daß auf der Unterseite des Bauteils 42 nur schmale Stege zwischen den Durchgängen 36 übrig bleiben. Hierdurch wird der Anteil der Sekundärelektronen, die in die Durchgänge 36 gelangen, vergrößert.

Die Sekundärelektronen gelangen in Fig. 5 (je nach Fokussierung der Sekundärelektronen) in den Durchgang 41 und/oder in die Durchgänge 36. Wenn ein Sekundärelektron auf die schlecht leitfähige Schicht an der Oberfläche eines Durchgangs trifft, erzeugt es dort mit hoher Wahrscheinlichkeit mindestens ein Sekundärelektron (wie in einem Channeltron oder einer Channelplate) und liefert dadurch einen Beitrag zum Signal des Detektors.

Mit dem in Fig. 5 dargestellten Aufbau ist auch der Betrieb mit Vakuum oder sehr geringem Druck in der Probenkammer möglich. Wenn die untere Druckstufenblende 18 entfernt wird, wird hiermit auch bei großem Abstand (> 5 mm) zwischen der Probe 11 und der Elektrode 25 eine gute Auflösung und eine gute Detektionseffizienz erreicht. Die Spannung zwischen den Elektroden 25 und 39 ist dabei so groß, daß die elektrische Feldstärke direkt unterhalb des Durchgangs 41 gleichgroß ist wie innerhalb des Durchgangs 41. Ein sehr großes Gesichtsfeld erhält man hiermit bei Verwendung eines Doppelablenkelementes, wenn das Rasterzentrum nahe oberhalb oder in den Durchgang 41 gelegt wird.

Eine besonders vorteilhafte und bevorzugte Ausgestaltung des in Fig. 5 dargestellten Aufbaus besteht darin, daß das Bauteil 42 sehr nahe an der unteren Druckstufenblende 18 angeordnet wird (mit einem bevorzugten Abstand von weniger als 2 mm zur Druckstufenblende 18). Hierbei wird auf die Durchgänge 36 verzichtet und der Durchgang 41, das Bauteil 42, die Isolierung 40 und die leitfähige Schicht 39 verjüngen sich kegelförmig nach unten hin. Für nicht zu kleine Vergrößerungen (\geq ca. 1000-fach) ergibt diese Variante in Verbindung mit der Einpolinse 64 eine sehr gute Detektionseffizienz. Für kleine Vergrößerungen wird die Einpolinse 64 ausgeschaltet.

In den Ausführungsbeispielen aus Fig. 1 bis Fig. 5 ist eine kombinierte elektrostatische und magnetische Objektivlinse

vorgesehen.

Im Gegensatz dazu zeigen Fig. 6 und Fig. 7 ein Ausführungsbeispiel, bei dem eine rein magnetische Objektivlinse bevorzugt wird. Fig. 6 und Fig. 7 stellen denselben Aufbau in zwei verschiedenen Schnitten dar. Der Schnitt in Fig. 6 geht durch die Öffnung 35 und das Rohr 31. Der Schnitt in Fig. 7 geht hingegen durch die Öffnung 38 und das Rohr 32. Die Rohre 31 und 32 sind einander benachbart. Der in Fig. 6 und 7 dargestellte, weitgehend rotationssymmetrische Aufbau, der mehrere Druckstufenblenden und einen Detektor enthält, wird unterhalb der Objektivlinse 61 angebracht. Im dargestellten Ausführungsbeispiel hat das Bauteil 37 (Druckreduzierer) eine ungerade Anzahl konisch geformter Durchgänge 36 (Druckreduzierungskanäle), deren Öffnungen 29 die untere Stirnseite des Bauteils 37 bedecken. Zwischen den Öffnungen 29 bleiben von der unteren Stirnseite des Bauteils 37 nur schmale Stege übrig. Längs eines solchen Steges verläuft der Schnitt durch das Bauteil 37 in der linken Hälfte von Fig. 6.

Die bevorzugte Größe der Druckstufenblendenöffnungen 16 und 41 ist abhängig vom gewünschten maximal zulässigen Druck in der Probenkammer, von der gewünschten kleinsten verwendbaren Primärenergie und von der Güte des Vakuums, das die Kathode benötigt. Es ist möglich, oberhalb der Druckstufenblende 44 weitere Druckstufenblenden einzufügen und die entstehenden Zwischenräume zu evakuieren. Die bevorzugten Durchmesser der Öffnungen 16 und 41 sind dieselben wie in Fig. 2, wobei die Öffnung 41 aber auch kleiner sein kann als die Öffnung 16.

Der Weg des Primärelektronenstrahls durch die Öffnungen 41 und 16 zur Probe 11; die Spannung zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 und die Bewegung der Sekundärelektronen von der Probe 11 zur Öffnung 16 und durch die Öffnung 16 hindurch sind in Fig. 6 dieselben wie in Fig. 2. Das elektrische Feld zwischen den Druckstufenblenden entspricht hingegen nur in einem Bereich nahe oberhalb der Öffnung 16 dem elektrischen Feld in Fig. 2. Es wird in Fig. 6 durch die Potentialdifferenzen der Elektroden 18, 24, 28 und 44 erzeugt und lenkt die Sekundärelektronen zu den Öffnungen 29. Mit dem dargestellten Aufbau ist nicht nur der Betrieb mit Gas in der Probenkammer, sondern auch der Betrieb mit Vakuum in der Probenkammer möglich.

Die Elektrode 28 besteht aus einer leitfähigen Schicht, die auf der Oberfläche des isolierenden Bauteils 37 aufgebracht ist. Sie liegt gegenüber der Elektrode 18 auf positivem Potential. Die bevorzugte Potentialdifferenz, die von der geometrischen Anordnung der Elektroden 18, 24, 28 und 44 und von der Größe der Öffnung 16 abhängig ist, beträgt 30 bis 1000 V.

Die Elektrode 24 ist vorzugsweise als dünne Metallschicht auf dem Isolator 21 aufgebracht, der ebenfalls als Beschichtung auf der Elektrode 18 aufgebracht sein kann. Um störende Aufladungen an freiliegenden Oberflächen der Isolatoren 21, 37, 53 und 57 zu verhindern, können sie mit einer schlecht leitfähigen Beschichtung versehen werden. Das Potential der Elektrode 24 liegt zwischen den Potentialen der Elektroden 18 und 28. Durch das elektrische Feld der Elektrode 24 wird der Anteil der Sekundärelektronen vergrößert, die zu den Öffnungen 29 gelangen. Die Elektrode 24 und der Isolator 21 können aber auch weggelassen werden, um den Aufbau zu vereinfachen.

Die Elektrode 44 liegt gegenüber der Elektrode 28 auf negativem oder demselben Potential mit einer bevorzugten Potentialdifferenz bis zu mehreren hundert Volt. Die Verwendung desselben Potentials hat den Vorteil, daß eine Ausführung als gemeinsames Bauteil möglich ist, während die dargestellte Ausführung in zwei getrennten Bauteilen den Vor-

teil hat, daß ein größerer Anteil der Sekundärelektronen zu den Öffnungen 29 gelangt. Die Kontaktierung der Elektrode 44 erfolgt in Fig. 6 über einen isolierten Draht 34, der in der schmalen Wand zwischen zwei Durchgängen 36 in einer Bohrung durch das Bauteil 37 geführt ist. An der Stelle, wo der Draht die Elektrode 44 kontaktiert, hat die Isolierung 45 eine Aussparung.

Gegenüber der geerdeten Objektivlinse 61 und dem Bauteil 54 ist die Elektrode 44 durch die Isolierungen 49 und 53 isoliert und bildet mit dem Bauteil 54 eine schwache elektrostatische Linse. Dies hat den Vorteil, daß die Probe 11 geerdet sein kann. Einen einfacheren Aufbau erhält man hingegen, wenn die Isolierung 49 weggelassen wird und die Elektrode 44 zusammen mit dem Bauteil 54 als ein gemeinsames Bauteil ausgeführt wird.

Das durch die Öffnung 16 aus der Probenkammer einströmende Gas wird durch die seitliche Öffnung 35 abgepumpt. Wie in Fig. 2 findet auch in Fig. 6 eine starke Druckabnahme oberhalb der Öffnung 16 und eine Zunahme der mittleren freien Weglänge der Sekundärelektronen statt, so daß viele Sekundärelektronen ihren letzten Stoß in geringer Entfernung oberhalb der Öffnung 16 haben. Die elektrische Feldstärke oberhalb der Druckstufenblende 18 kann bei der Gestaltung gemäß den Fig. 6 und 7 in breiten Bereichen frei gewählt werden. Sie kann wesentlich geringer als bei der Gestaltung gemäß den Fig. 2 bis 5 sein und ist mindestens so hoch, daß die Sekundärelektronen zur Erzielung einer anwendungsabhängig genügenden Detektionseffizienz gut durch die Druckstufenblendenöffnung 16 hindurchgelangen.

In Fig. 7 ist die Funktion des Bauteils 37 zu erkennen: Es bewirkt, daß der Druck beim Detektor 51 um mehrere Größenordnungen geringer ist als der Druck unterhalb der Öffnungen 29. Die Druckdifferenz kommt dadurch zustande, daß die langgestreckten schmalen Durchgänge 36 einen großen Strömungswiderstand für das Gas darstellen und daß der Raum oberhalb des Bauteils 37, in den die Durchgänge 36 münden, durch die seitlichen Öffnungen 38 und 52 evakuiert wird. Dieselbe Wirkung kann beispielsweise auch mit zylindrisch geformten Durchgängen 36 erreicht werden. Bei gleicher Größe der Öffnungen 29 ist dann allerdings eine größere Baulänge erforderlich, um denselben Strömungswiderstand zu erreichen. Wenn große Druckstufenblendenöffnungen 16 verwendet werden sollen, ist eine besonders große Druckdifferenz erforderlich. Diese erreicht man, indem die Durchgänge 36 beispielsweise auf halber Höhe zusätzliche seitliche Öffnungen erhalten, durch die mit einer zusätzlichen differentiellen Pumpstufe abgepumpt wird.

In dem isolierenden Bauteil 37 ist die Oberfläche in den Durchgängen 36 wie in Fig. 5 mit einer schlecht leitfähigen Schicht bedeckt. Auf Grund der Spannung zwischen den Elektroden 28 und 46, mit denen die schlecht leitfähige Schicht kontaktiert ist, entstehen ein Spannungsabfall und ein elektrisches Feld längs der Durchgänge 36. Der Verlauf des elektrischen Feldes längs der Durchgänge 36 wird durch das äußere elektrische Feld, sowie durch den Verlauf der spezifischen Leitfähigkeit, der Schichtdicke und des Umfangs der schlecht leitfähigen Schicht bestimmt. Es ist günstig, wenn die Feldstärke überall längs der Durchgänge 36 möglichst hoch ist, aber unterhalb des (ortsabhängigen) Grenzwertes liegt, ab dem Überschlüge auftreten. Die konisch geformten Durchgänge 36 sind in dieser Hinsicht vorteilhaft: Die Zunahme der elektrischen Feldstärke, die durch den nach oben hin abnehmenden Umfang der schlecht leitfähigen Schicht bewirkt wird, paßt zur Zunahme der Durchschlagsfestigkeit auf Grund des nach oben hin abnehmenden Gasdruckes. Eine weitere Möglichkeit, um den optimalen Verlauf des elektrischen Feldes längs der Durchgänge 36 zu

erreichen, besteht darin, die spezifische Leitfähigkeit oder die Schichtdicke der schlecht leitfähigen Schicht längs der Durchgänge 36 zu variieren.

Nachdem die Sekundärelektronen die unteren Öffnungen 29 der Durchgänge 36 erreicht haben, werden sie durch das elektrische Feld in den Durchgängen 36 zu den oberen Öffnungen 47 der Durchgänge 36 geleitet. Sekundärelektronen, die auf die schlecht leitfähige Schicht treffen, erzeugen dort mit hoher Wahrscheinlichkeit ein oder mehrere Sekundärelektronen und tragen somit auch zum Signal des Detektors bei. Dadurch, daß die Äquipotentialflächen in den Durchgängen 36 in Richtung zu den unteren Öffnungen 29 hin durchgewölbt sind, werden Sekundärelektronen mit geringer kinetischer Energie von den Wänden der Durchgänge 36 wegelenkt.

Oberhalb der Öffnungen 47 herrscht ein starkes elektrisches Feld, das die Sekundärelektronen zum Detektor 51 beschleunigt, wo sie detektiert werden. Die bevorzugte Spannung zwischen der Elektrode 46 und dem Detektor 51, der über einen isolierten Draht kontaktiert ist, beträgt 1 bis 10 kV. Als Detektor 51 kann beispielsweise ein Halbleiterdetektor oder ein Szintillator verwendet werden. Bei Verwendung eines Szintillators ist das isolierende Bauteil 57 ein Lichtleiter. Das isolierende Bauteil 57 wird mit dem darunterliegenden restlichen Aufbau durch einige, über den Umfang verteilte Halteklammern 48 zusammengehalten.

Eine bevorzugte Ausgestaltung des in Fig. 6 und 7 dargestellten Aufbaus besteht darin, daß er unter der Objektivenlinse 61 angebracht und entfernt werden kann, ohne daß die Probenkammer belüftet wird, indem er von einer Flanschöffnung aus bewegt wird. Der Aufbau ist gegenüber der Flanschöffnung mit einem Faltenbalg abgedichtet und wird beim Betrieb mit Vakuum in der Probenkammer soweit zurückgezogen, daß er nicht stört.

In Fig. 1 werden nur diejenigen Sekundärelektronen detektiert, die beim Erreichen des Detektors 74 einen ausreichend großen Abstand von der optischen Achse 79 haben, um nicht durch die Öffnung 77 des Detektors zu fliegen. Die restlichen Sekundärelektronen fliegen durch die Öffnung 77 des Detektors. Um die Detektionseffizienz des Druck-REMs zu erhöhen, werden in dem Ausführungsbeispiel von Fig. 8 auch diese Sekundärelektronen 86 detektiert. Hierzu wird ein zusätzlicher oberer Detektor 91 verwendet, der nahe unterhalb der Aperturblende 94 angebracht ist. Die Elektrode 55 ist nach oben hin bis über die Aperturblende verlängert, und die Aperturblende 94 und der Detektor 91 liegen auf dem Potential der Elektrode 55. Aufgrund der kleinen Baugröße ist beispielsweise die Verwendung eines Halbleiterdetektors (mit nachgeschaltetem Optokoppler) als oberem Detektor 91 vorteilhaft.

Der untere Detektor 74 und die Aperturblende 94 werden gleichzeitig auch als Druckstufenblenden verwendet. Zwischen den Druckstufenblenden 44, 74 und 94 und oberhalb der Druckstufenblende 94 wird durch die Öffnungen 73, 76 und 98 abgepumpt, wie es die Pfeile andeuten. Für die Verwendung der Aperturblende 94 als Druckstufenblende ist ein elektromagnetischer Aperturblendenwechsler vorteilhaft, weil die Aperturblende dann nicht beweglich zu sein braucht.

Fig. 9 zeigt eine andere Variante eines erfindungsgemäßen Druck-REMs mit zusätzlichem oberem Detektor 91, der hier als Kombination mit der Aperturblende 94 ausgeführt ist. Eine bevorzugte Ausführungsform besteht in der Verwendung von Halbleitermaterial für das kombinierte Bauteil, wobei das Halbleitermaterial im Bereich um die optische Achse 79 herum bis auf eine geringe Dicke ($< 100 \mu\text{m}$) weggeätzt sein kann, so daß die Aperturblendenöffnungen nur eine geringe Länge haben. Von oben ist eine Metallbe-

schichtung aufgebracht, die als Aperturblende 94 wirkt und von unten ist das kombinierte Bauteil als Halbleiterdetektor 91 ausgebildet. Für den mit der Aperturblende 94 kombinierten oberen Detektor 91 besteht eine bevorzugte Ausführungsform darin, daß oberhalb der Aperturblende 94 Ultrahochvakuum herrscht, damit die Aperturblende nicht beheizt zu werden braucht.

In Fig. 9 wird der von der Kathode 99 emittierte Primärelektronenstrahl mit Hilfe eines elektromagnetischen Aperturblendenwechslers durch die gewünschte Öffnung der Aperturblende 94 gefädelt. Unterhalb des Detektors 91 wird der Primärelektronenstrahl 82 durch die Magnetfelder 83 und 80 wieder auf die optische Achse gelenkt. Der anschließende Weg ist für die Primärelektronen und die Sekundärelektronen derselbe wie in Fig. 1. Bei dem in Fig. 9 dargestellten Aufbau werden auch die Sekundärelektronen 85 (und Rückstreuungselektronen mit geringen Energieverlusten), die längs der optischen Achse durch die Öffnung 77 des unteren Detektors fliegen, durch die Magnetfelder 80 und 83 von der optischen Achse abgelenkt und zum oberen Detektor 91 geleitet.

Der in Fig. 8 und 9 dargestellte zusätzliche obere Detektor 91 kann mit den Ausführungsbeispielen aus Fig. 2 bis Fig. 5 kombiniert werden, sowie mit jedem Korpuskularstrahlgerät, bei dem der primäre Korpuskularstrahl nahe am Rand des Detektors 74 vorbeifliegt (beispielsweise durch eine Öffnung 77 des Detektors) und bei dem zwischen der Probe 11 und dem Detektor 74 ein elektrisches Feld vorhanden ist, das die Sekundärkorpuskeln in Richtung zum Detektor 74 beschleunigt. Die Detektion der Sekundärelektronen bzw. Sekundärkorpuskeln, die am Rand des unteren Detektors 74 vorbei geflogen sind (beispielsweise durch eine Öffnung 77 des Detektors), bewirkt sowohl beim Betrieb mit Gas in der Probenkammer als auch beim Vakuumbetrieb eine Erhöhung der Detektionseffizienz.

Beim Betrieb mit Vakuum in der Probenkammer bewirkt der zusätzliche obere Detektor 91 eine starke Verbesserung der Detektionseffizienz, wenn die Sekundärelektronen unter ungünstigen Betriebsbedingungen auf die Öffnung 77 des unteren Detektors fokussiert werden. Weiterhin macht sich die Verbesserung der Detektionseffizienz für die Bildmitte von Bildern mit niedriger Vergrößerung positiv bemerkbar. Bei der Aufnahme von Bildern mit dem unteren Detektor 74 fällt bei niedriger Vergrößerung nämlich ein dunkler Bereich in der Mitte des Bildes auf, der dadurch zustande kommt, daß bei den achsnahen Probenstellen mehr Sekundärelektronen durch die Öffnung 77 des unteren Detektors fliegen als bei den achsfernen Probenstellen. Dieser nachteilige Effekt entfällt, wenn man zum Signal des unteren Detektors 74 das Signal des oberen Detektors 91 hinzuaddiert, das von den Sekundärelektronen stammt, die durch die Öffnung 77 des unteren Detektors geflogen sind. Außerdem bringt der zusätzliche obere Detektor 91 im Vakuumbetrieb ein sehr wertvolles zusätzliches Signal. Es wird insbesondere durch diejenigen Sekundärelektronen erzeugt, die von der Probe unter kleinen Winkeln zur optischen Achse emittiert werden und deshalb vom unteren Detektor 74 nicht detektiert werden können, sondern durch seine Öffnung 77 fliegen. Sie sind für die Untersuchung tiefer Löcher und stark zerklüfteter Strukturen erforderlich, für die der zusätzliche obere Detektor in idealer Weise geeignet ist. Da er von allen Probenstellen nur die Sekundärelektronen erfaßt, die unter kleinen Winkeln zur optischen Achse emittiert werden, erscheint der Boden eines tiefen Loches ähnlich hell wie erhabene Probenstellen. Um im Vakuumbetrieb Sekundärelektronen mit unterschiedlich großen Startwinkeln getrennt nachzuweisen, kann der Detektor 91 in mehrere teilchensensitive Bereiche aufgeteilt sein, die beispielsweise

konzentrisch zur optischen Achse angeordnet sein können. Dieselben Vorteile erhält man auch bei der Verwendung des zusätzlich oberen Detektors in einem Korpuskularstrahlgerät.

Für große Abstände zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 findet bei Verwendung einer kleinen Druckstufenblendenöffnung 16 für die in Fig. 1 bis Fig. 9 dargestellten erfindungsgemäßen Druck-REMs eine Verschlechterung der Auflösung und der Detektionseffizienz statt. Dies kann aber durch die Kombination mit anderen Detektoren, die für große Arbeitsabstände gut geeignet sind, weitgehend vermieden werden: Das elektrische Feld zwischen den Elektroden 18 und 44 (bzw. 18 und 39 in Fig. 3 und 5) bildet eine elektrostatische Linse, die bei großem Abstand zur Probe 11 eine Auflösungsver schlechterung bewirkt. Dies kann vermieden werden, indem die elektrostatische Linse beim Betrieb mit großem Arbeitsabstand ausgeschaltet und rein magnetisch fokussiert wird. Hierzu werden die Elektroden 18, 25, 44 (bzw. 39 und 43 in Fig. 3 und 5), 50 und 55 (bzw. 24 und 28 in Fig. 6 und 7) alle auf dasselbe Potential gelegt. Für den Betrieb mit Gas in der Probenkammer wird dann ein Kollektorelektroden-Detektor (WO 88/09564 A1, WO 90/04261 A1) und für den Betrieb mit Vakuum in der Probenkammer ein seitlich angeordneter Everhardt-Thornley-Detektor verwendet. Als Kollektorelektrode wird die Druckstufenblende 18 und/oder eine demgegenüber isolierte Kollektorelektrode 13, wie sie beispielsweise in Fig. 4 dargestellt ist, verwendet. Mit dem Kollektorelektroden-Detektor, für den bei dem großen Abstand zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 günstige Betriebsbedingungen herrschen, wird dann immerhin dasselbe Signal-zu-Rausch-Verhältnis erreicht wie bei den heute bekannten Druck-REMs.

Das rein magnetische Fokussieren, bei dem die Elektrode 55 auf ein erdnahes Potential (< 1000 V) gelegt wird, ist für Primärenergien \geq ca. 5 keV auch bei Verwendung einer Feldemissionskathode oder eines Schottky-Emitters ohne wesentliche Auflösungseinbußen möglich (weil die Extraktionselektrode nur bei Primärenergien $<$ ca. 5 keV auf einem stark positivem Potential liegt). Beim Betrieb mit Gas in der Probenkammer macht sich diese Beschränkung auf hohe Primärenergien gar nicht bemerkbar, weil bei einem typischen Gasdruck von beispielsweise 10 hPa für größere Abstände zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 sowieso nur Primärenergien $>$ 5 keV in Frage kommen.

Dadurch, daß bei großen Arbeitsabständen die elektrostatische Linse oberhalb der Druckstufenblende 18 ausgeschaltet wird, findet neben der Auflösungsverbesserung auch eine Erweiterung des Gesichtsfeldes statt, da die Verzerrungen am Rand des Gesichtsfeldes verschwinden. Eine vorteilhafte Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Druck-REMs, die bei großem Abstand zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 eine starke Vergrößerung des Gesichtsfeldes bewirkt, besteht darin, daß statt der Ablenkspulen 59 ein Doppelablenkelement verwendet wird. Hiermit kann die Lage des Rasterzentrums auf der optischen Achse frei gewählt werden. Das größtmögliche Gesichtsfeld wird dabei erreicht, wenn um einen Punkt zwischen den beiden Druckstufenblenden 18 und 44 gerastert wird, dessen Lage auf der optischen Achse 79 so gewählt ist, daß das Gesichtsfeld sowohl von der unteren Druckstufenblende 18 als auch von der darüberliegenden Druckstufenblende 44 begrenzt wird.

Für Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Druck-REMs, die bei hohem Druck in der Probenkammer (\geq 100 hPa) oder bei geringen Primärenergien ($<$ 2 keV bei beispielsweise 10 hPa) arbeiten, entstehen Einschränkungen für den Arbeitsabstand und das Gesichtsfeld dadurch, daß

hierfür kleine Abstände (< 300 μ m) zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 und ein kleiner Durchmesser (< 300 μ m) der Öffnung 16 zwingend notwendig sind.

Berührungen zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 beim Bewegen des Probentisches können beim Betrieb mit Gas in der Probenkammer für leitfähige Proben trotzdem sicher vermieden werden. Hierzu wird eine Spannung zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 angelegt und sind Schutzwiderstände eingebaut, so daß Gasentladungen zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 zugelassen werden können und als Warnzeichen für einen kleinen Abstand zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 verwendet werden können. Eine andere Methode, mit der Berührungen auch zwischen nichtleitenden Proben 11 und der Druckstufenblende 18 nach Vermessung der Probentopographie sicher vermieden werden können, wird nachfolgend beschrieben.

Die Einschränkung des Gesichtsfeldes durch die Druckstufenblendenöffnung 16 kann durch die nachfolgend beschriebenen Ausgestaltungen der erfindungsgemäßen Druck-REMs kompensiert werden. Eine bevorzugte Ausgestaltung besteht in der Kombination mit einem computergesteuerten Probentisch und einer Bildverarbeitung, die es ermöglicht, mehrere elektronenmikroskopische Einzelbilder zu einem größeren Gesamtbild zusammenzusetzen. Eine weitere bevorzugte Ausgestaltung besteht in der Integration eines Auflichtmikroskopes oder eines konfokalen Lasermikroskopes in die Probenkammer. Hiermit wird vor der Untersuchung mit dem Elektronenstrahl von der bereits auf dem Probentisch montierten Probe ein Übersichtsbild aufgenommen und vom Computer gespeichert. Bei großen Proben kann das Übersichtsbild aus mehreren Einzelbildern zusammengesetzt sein. In diesem Bild können mit Hilfe des Computers Stellen markiert werden, die dann von dem computergesteuerten Probentisch für die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung angefahren werden. Solche lichtmikroskopischen Übersichtsbilder machen rasterelektronenmikroskopische Übersichtsbilder im Druck-REM weitgehend überflüssig.

Wenn mit dem Auflichtmikroskop oder dem konfokalen Lasermikroskop gleichzeitig auch noch die Probentopographie vermessen und vom Computer gespeichert wird, dann kann bei der nachfolgenden Untersuchung mit dem Elektronenstrahl auch der Arbeitsabstand vom Computer ohne zusätzliche Abstandskontrolle eingestellt werden und können beim Bewegen des Probentisches Berührungen zwischen der Probe 11 und der Druckstufenblende 18 sicher vermieden werden.

Patentansprüche

1. Rasterelektronenmikroskop mit einem Strahlerzeuger und einer Probenkammer, zwischen denen eine oder mehrere Druckstufenblenden angeordnet sind, durch deren Öffnungen ein Primärelektronenstrahl auf eine Probe in der Probenkammer lenkbar ist, wobei die der Probe nächste, unterste Druckstufenblende (18), durch die der Primärelektronenstrahl auf die Probe trifft, dazu eingerichtet ist, einen erhöhten Druck in der Probenkammer gegenüber der übrigen Mikroskopsaule des Rasterelektronenmikroskops abzuschirmen und durch ihre Öffnung (16) Sekundärelektronen oder Rückstreuelektronen von der Probe zu mindestens einem Detektor durchzulassen, dadurch gekennzeichnet, daß oberhalb der untersten Druckstufenblende (18) mindestens eine Elektrode (24, 43, 44, 50, 55) angeordnet ist, die gegenüber der Druckstufenblende (18) auf positivem Potential liegt und dazu eingerichtet ist,

die Sekundärelektronen oder Rückstreuelektronen von der Probe hin zum Detektor (51, 74, 91) zu beschleunigen, der ein hochempfindlicher, gegenüber der Probe positiv vorgespannter Detektor ist.

2. Rasterelektronenmikroskop mit einem Strahlerzeuger und einer Probenkammer, zwischen denen eine oder mehrere Druckstufenblenden angeordnet sind, durch deren Öffnungen ein Primärelektronenstrahl auf eine Probe in der Probenkammer lenkbar ist, von denen die unterste Druckstufenblende (18) dazu eingerichtet ist, einen erhöhten Druck in der Probenkammer gegenüber der übrigen Mikroskopsäule des Rasterelektronenmikroskops abzuschirmen, insbesondere Rasterelektronenmikroskop nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Rasterelektronenmikroskop zur Detektion der Sekundärelektronen durch die Öffnung mindestens einer Druckstufenblende eingerichtet ist, die schichtweise aus mindestens zwei leitfähigen, voneinander elektrisch isolierten Schichten 28, 39, 43, 46 aufgebaut ist, wobei die leitfähigen Schichten derart mit Potentialen beaufschlagbar sind, daß die Unter- und Oberseite der jeweiligen Druckstufenblende eine Potentialdifferenz besitzen.

3. Rasterelektronenmikroskop gemäß Anspruch 1 oder 2, bei dem die unterste Druckstufenblende (18) und/oder die darüberliegenden Elektroden (24, 28, 39, 43, 44, 50, 55) eine oder mehrere elektrostatische Linsen bilden, die zur Fokussierung des Primärelektronenstrahls im elektrischen Feld zwischen der Druckstufenblende (18) und der darüberliegenden Elektrode (44 bzw. 39) bzw. zwischen den darüberliegenden Elektroden (24, 28, 39, 43, 44, 50, 55) eingerichtet sind.

4. Rasterelektronenmikroskop gemäß Anspruch 1 oder 2, bei dem die Elektroden (24, 28, 39, 43, 44, 50, 55) konzentrisch zur optischen Achse des Rasterelektronenmikroskops angeordnet sind.

5. Rasterelektronenmikroskop gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei den die Oberfläche des Detektors (51, 75, 91) zumindest in Teilbereichen auf einem Potential liegt, das gegenüber dem Potential der Probe um mehr als 1.000 V positiv ist.

6. Rasterelektronenmikroskop gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei den eine kombinierte elektrostatische und magnetische Objektivlinse vorgesehen ist.

7. Rasterelektronenmikroskop gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem eine oder mehrere Elektroden (39, 44) oberhalb der untersten Druckstufenblende (18) weitere Druckstufenblenden bilden, wobei Pumpeinrichtungen zur Erzeugung von Unterdrücken in den Zwischenräumen zwischen den Druckstufenblenden vorgesehen sind.

8. Rasterelektronenmikroskop gemäß Anspruch 7, bei dem die als Druckstufenblenden gestalteten Elektroden Öffnungen besitzen, die eine charakteristische Dimension von weniger als 1,5 mm besitzen.

9. Rasterelektronenmikroskop gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die zum Mikroskopbetrieb bei erhöhtem Druck in der Probenkammer erforderlichen Bauteile (13, 18, 21, 24, 28, 31, 32, 34, 37, 39, 40, 42-46, 48, 49, 51, 53, 54, 57, 60, 63, 65, 68, 69) eine oder mehrere leicht demontierbare Baugruppen in der Probenkammer bilden.

10. Rasterelektronenmikroskop gemäß Anspruch 1, bei dem ein erster Detektor (74) mit seinem äußeren Rand oder einer inneren Öffnung (77) an den Primärelektronenstrahl angrenzend angeordnet und ein zweiter Detektor (91) vorgesehen ist, der in Bezug auf die

Bewegungsrichtung der Sekundärelektronen oder Rückstreuelektronen hinter dem Rand bzw. der Öffnung des ersten Detektors (74) positioniert und zur Detektion von Sekundärelektronen (85, 86) oder Rückstreuelektronen eingerichtet ist, die sich am Rand vorbei- oder durch eine Öffnung (77) hindurchbewegen.

11. Rasterelektronenmikroskop gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem eine Aperturblende (94) als Kombination mit einem Sekundärelektronendetektor (91) ausgeführt ist.

12. Rasterelektronenmikroskop gemäß Anspruch 10 oder 11, bei dem ein Magnetfeld (80) einstellbar ist, das simultan den Primärelektronenstrahl (82) nach Durchtritt durch eine Aperturblendenöffnung auf die optische Achse (79) und die Sekundärelektronen (85) von der optischen Achse (79) zum Detektor ablenkt.

Hierzu 8 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

Fig. 1

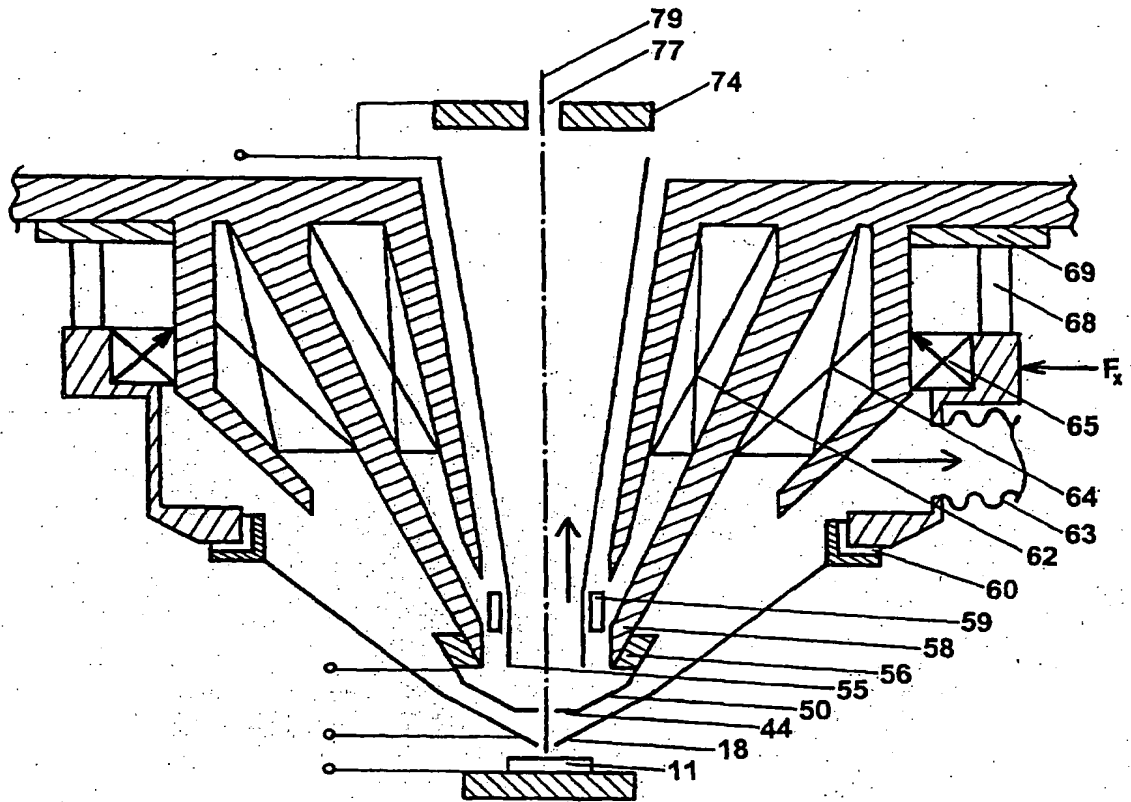


Fig. 2

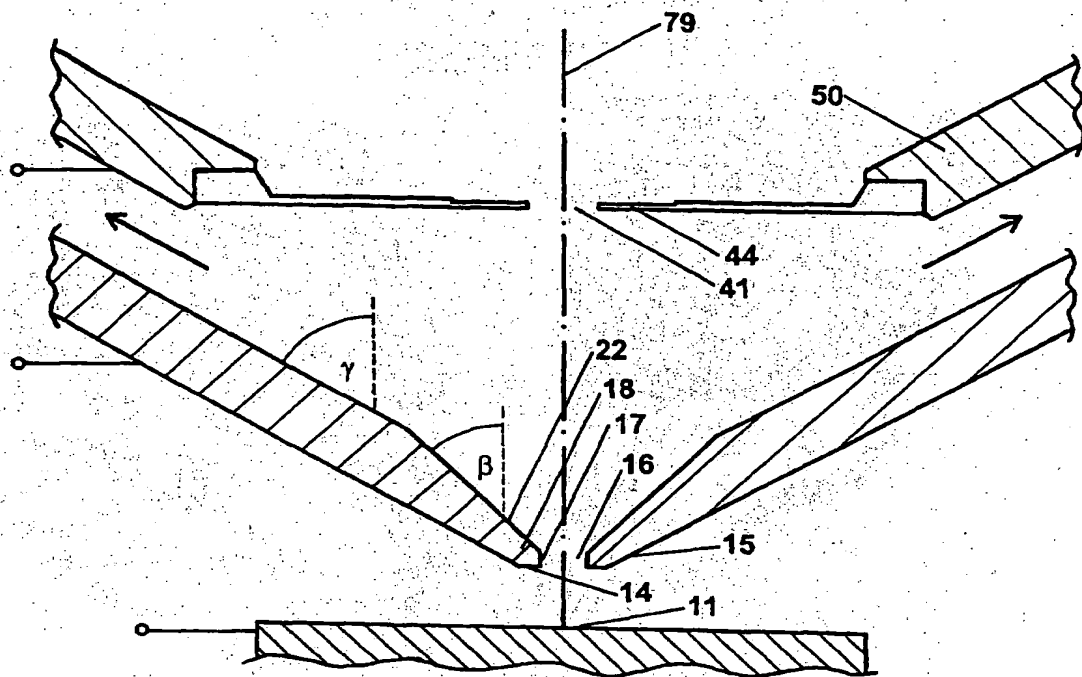


Fig. 3

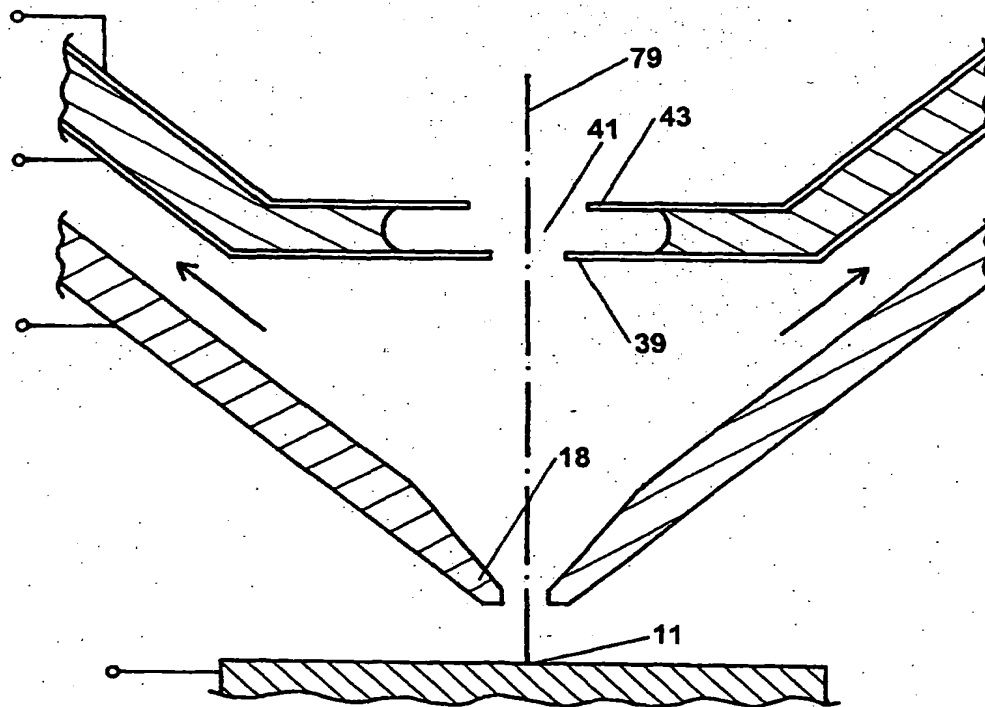
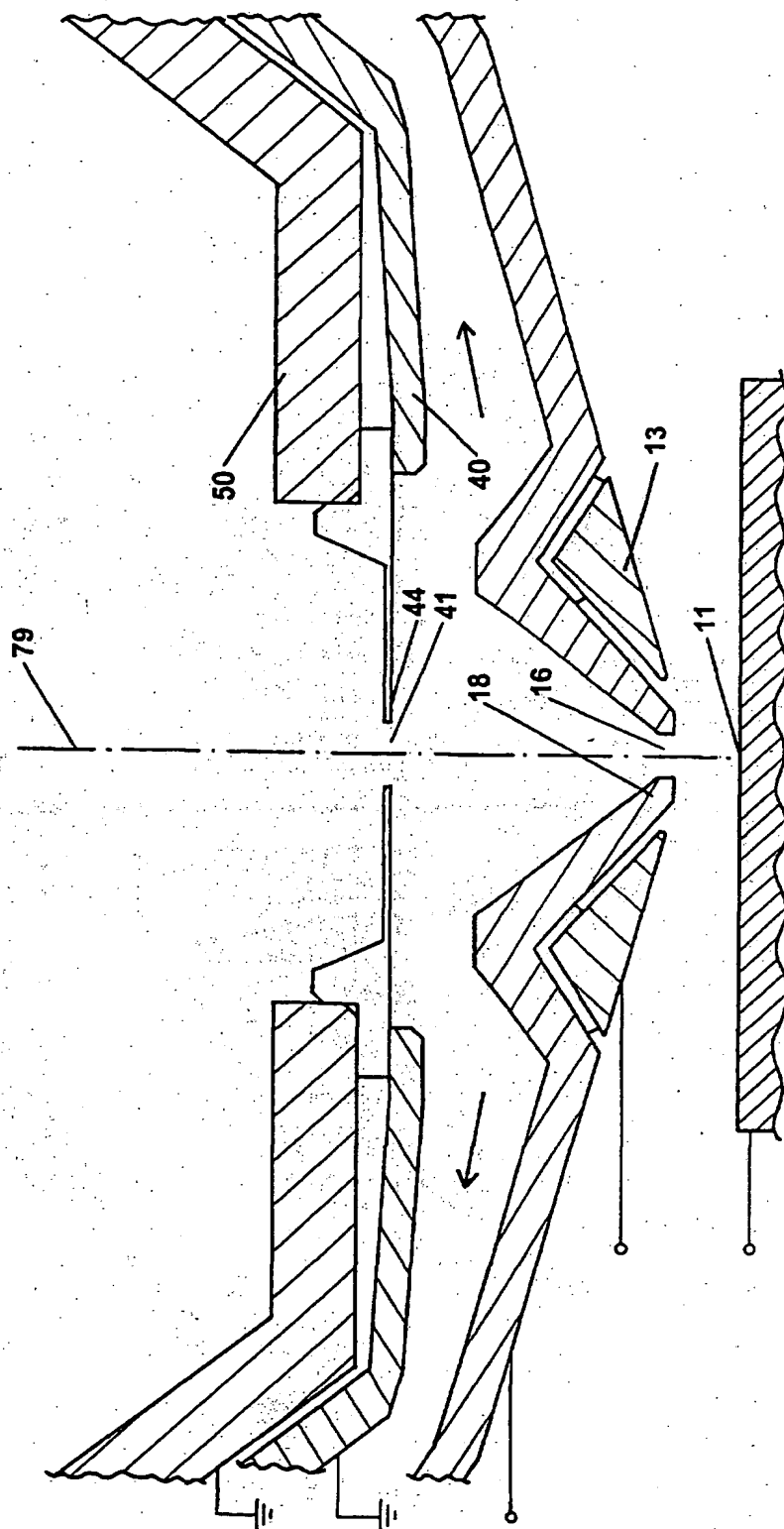


Fig. 4



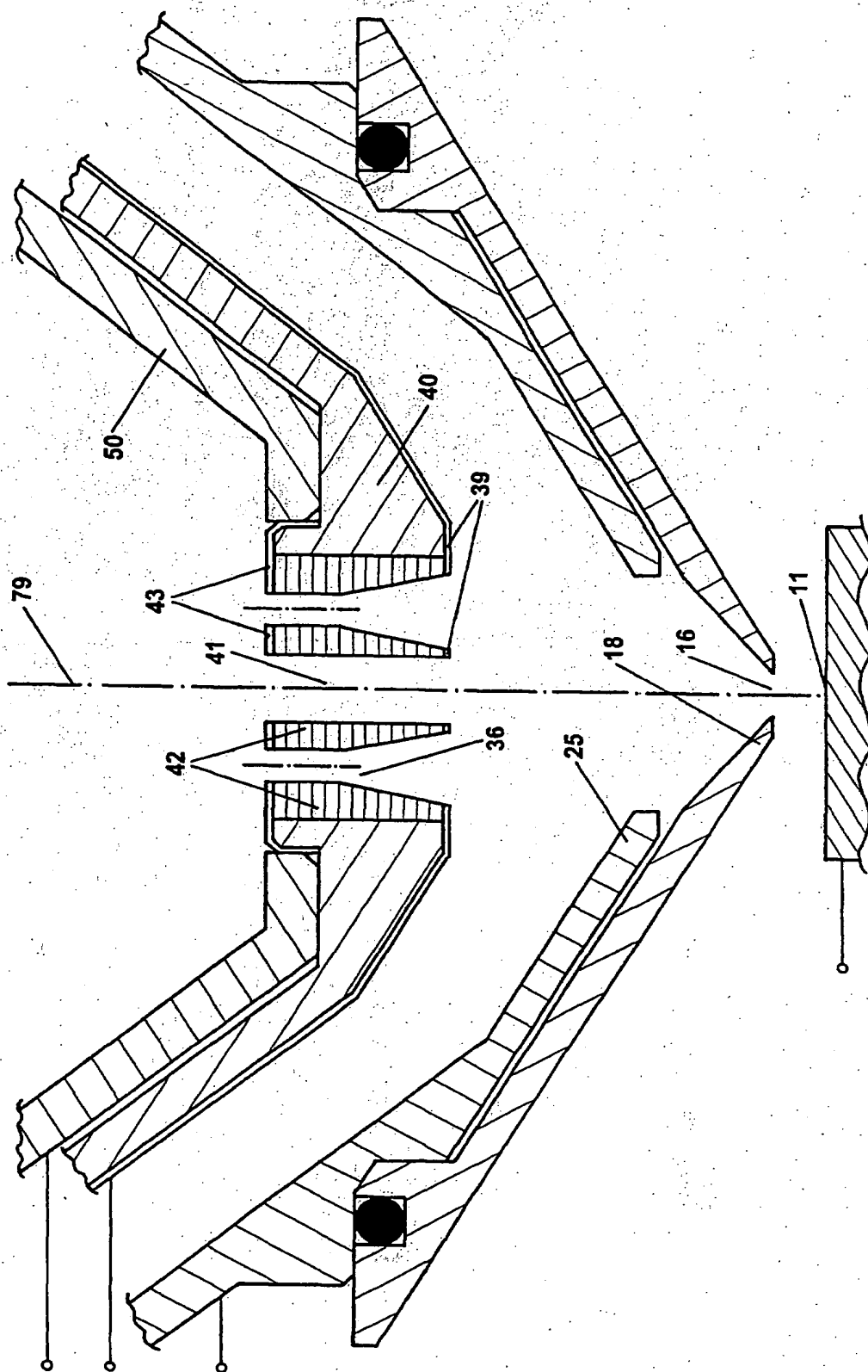


Fig. 5

Fig. 6

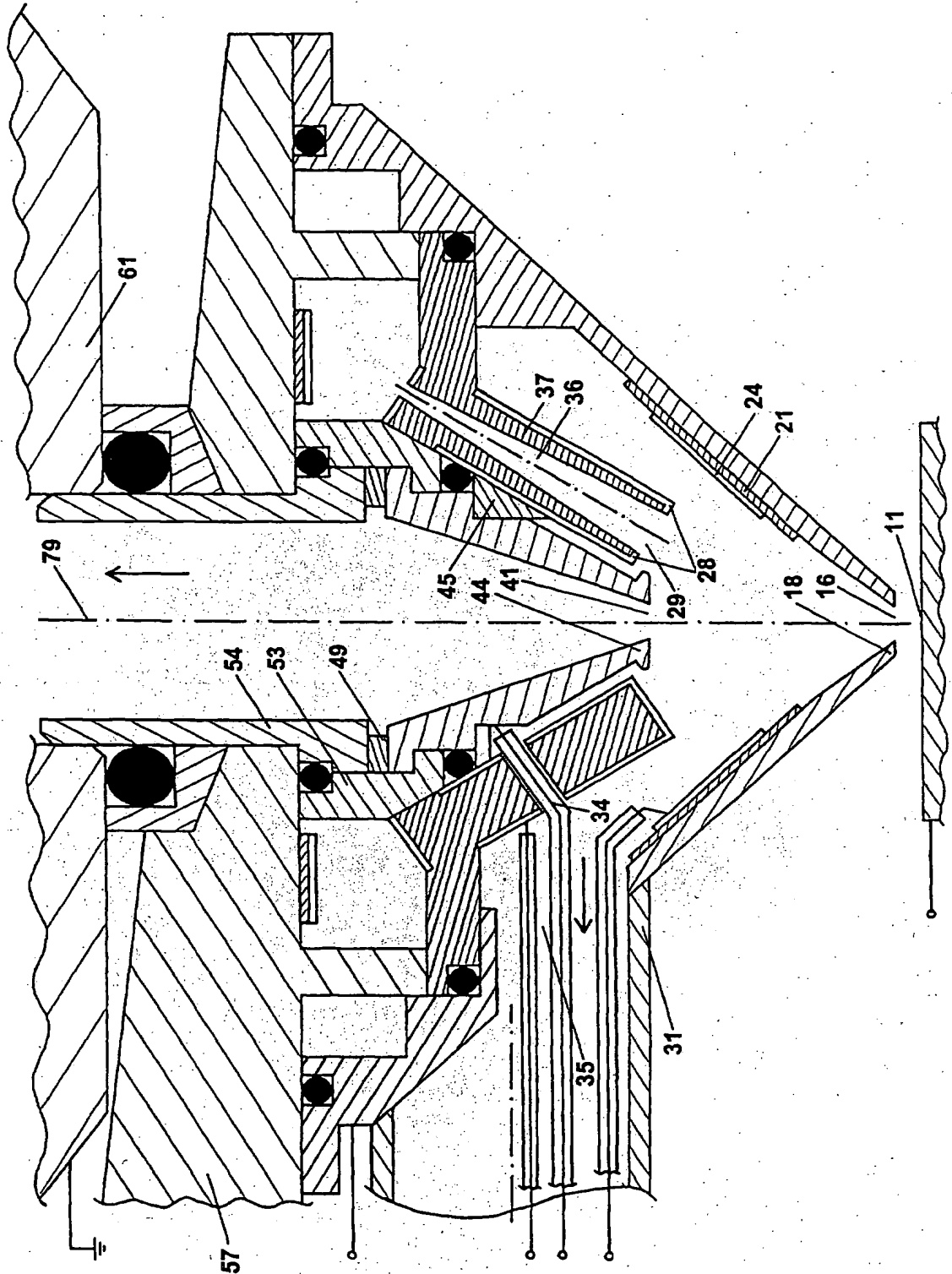


Fig. 7

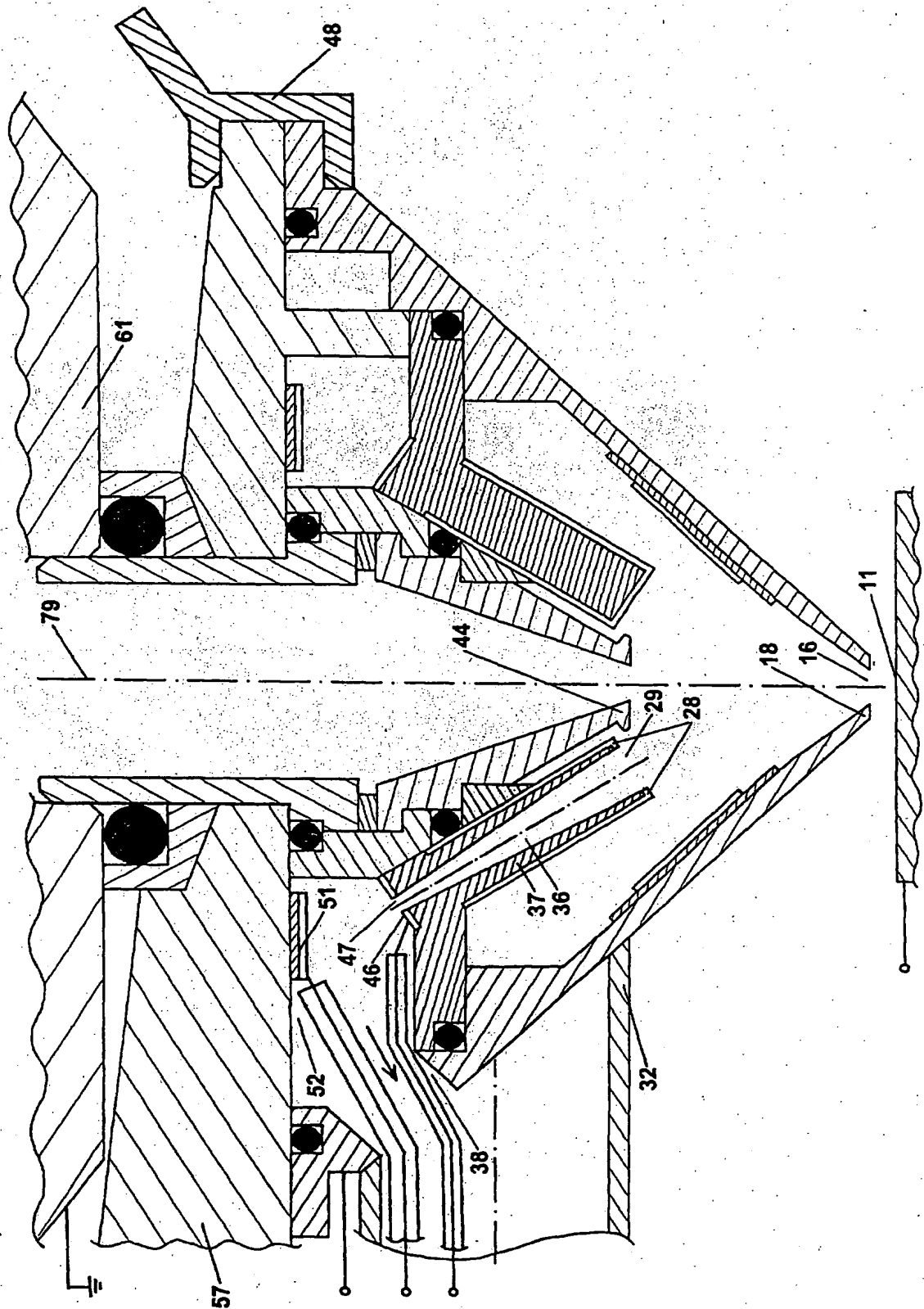


Fig. 8

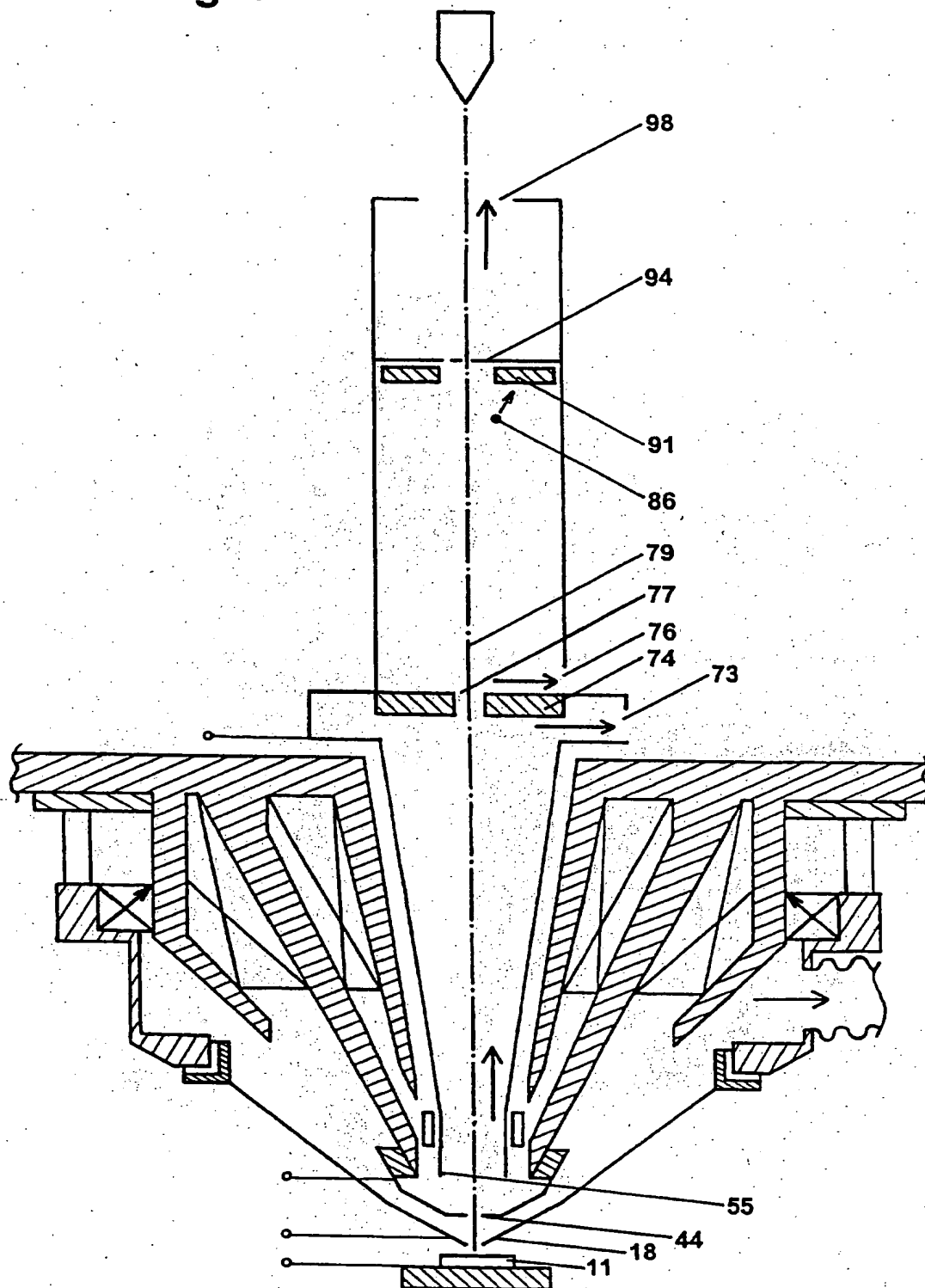


Fig. 9

